



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

TESE DE DOUTORADO

**Planejamento de Redes de Comunicação Sem Fio para
Ambiente *Indoor* Considerando os Efeitos da Polarização
das Antenas: Abordagem Baseada em Medições**

JOSIANE DO COUTO RODRIGUES

TD – 04/2011

UFPA / ITEC / PPGEE
BELÉM - PARÁ
2011

**Planejamento de Redes de Comunicação Sem Fio para
Ambiente *Indoor* Considerando os Efeitos da Polarização
das Antenas: Abordagem Baseada em Medições**

JOSIANE DO COUTO RODRIGUES

Trabalho submetido à Banca Examinadora do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

TD – 04/2011

UFPA / ITEC / PPGEE

BELÉM - PARÁ

2011



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Planejamento de Redes de Comunicação Sem Fio para
Ambiente *Indoor* Considerando os Efeitos da Polarização
das Antenas: Abordagem Baseada em Medições**

AUTORA: JOSIANE DO COUTO RODRIGUES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante - UFPA
Orientador

Prof. Dr-Ing. João Tavares Pinho - UFPA
Membro

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa - UFPA
Membro

Prof. Dr. Fernando José da Silva Moreira – UFMG
Membro Externo

Prof. Dr. Adaildo Gomes D'Assunção – UFRN
Membro Externo

Visto:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

A meus pais, Jaime e Regina, e a minha irmã Jane.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu força e saúde para começar e recomeçar este trabalho;

Ao Professor Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela dedicação, paciência e amizade com que me orientou na elaboração desta tese;

As minhas irmãs: Rejane, Jayne e Débora, pela amizade e amor que me deram força para continuar este trabalho;

Aos meus cunhados Vicente, Paulo e Mário pela amizade e carinho que me dedicaram;

Aos meus sobrinhos Caio e Maitê, pelas alegrias que me proporcionaram neste período árduo da vida;

Aos amigos Hermínio, Simone e Jasmine que me ajudaram a concluir este trabalho, formando, juntamente comigo, um grupo dedicado à pesquisa;

À ex-aluna, e agora amiga, Juliana Monteiro que tornou possível as campanhas de medição que resultaram nesta tese.

A todos os colegas do LEA (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado) pelo incentivo, ajuda e carinho;

Aos colegas do LCT (Laboratório de Computação e Telecomunicações) pela força braçal, inclusive, e pela amizade;

Aos professores do PPGEE que com seus ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho;

E a todos aqueles que, sem precisarem ser citados, estiveram presentes na elaboração desta tese.

SUMÁRIO

LISTA DE ACRÔNIMOS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2 – MOTIVAÇÃO	1
1.3 – OBJETIVO	2
1.4 – CONTRIBUIÇÕES	2
1.5 – ORGANIZAÇÃO DESTE TRABALHO	4
CAPÍTULO 2 – MODELOS DE PROPAGAÇÃO PARA AMBIENTE	5
<i>INDOOR</i>	
2.1 – MODELOS DETERMINÍSTICOS	5
2.1.1 – Técnica de traçado de raios	6
2.1.2 – Técnica de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD)	6
2.2 – MODELOS EMPÍRICOS	7
2.2.1 – Modelo <i>one slope</i> (ISM)	8
2.2.2 – Modelo Motley-Keenan	9
2.2.3 – Modelo do fator de piso e parede	10
2.2.4 – Modelo de multi-parede/piso(MWM) – COST231	11
2.2.5 – Modelo de multi-paredes e pisos – MWF	12
2.2.6 – Modelo de Seidel-Rappaport	13
2.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	13
CAPÍTULO 3 – MODELO PROPOSTO	15
3.1 – INTRODUÇÃO	15
3.2 – MODELO PROPOSTO	15
3.2.1 – Termo das perdas gerais	16
3.2.2 – Termo das métricas de QoS	17
3.2.2.1 – Parâmetros de QoS	18
3.2.3 – Termo do efeito da polarização das antenas	19
✓ Polarização – Conceito	19

✓ O Fator de Acoplamento de Polarização das Antenas (FAP)	20
✓ Medidas de polarização	21
✓ Metodologia para determinação do efeito da polarização	21
3.3 – PRIMEIRA MEDIÇÃO DO EFEITO DA POLARIZAÇÃO	22
3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
CAPÍTULO 4 – CAMPANHAS DE MEDIÇÃO	26
4.1 – INTRODUÇÃO	26
4.2 – PRÉDIO ANEXO	26
4.3 – PAVILHÃO DE SALAS DE AULA	27
4.4 – METODOLOGIA DA MEDIÇÃO	28
1. Determinação dos pontos de medição	28
2. Determinação da localização do transmissor	28
3. Medição da potência recebida	29
4. Medição dos parâmetros de QoS	30
Prédio Anexo	30
1. Conexão da rede em estudo	30
2. Geração de tráfego na rede em estudo	31
3. Transmissor VoIP	32
Pavilhão de Salas de Aula	32
1. Conexão da rede em estudo	32
2. Geração de tráfego na rede em estudo	32
3. Transmissor VoIP	33
4.5 – CAMPANHAS DE MEDIÇÃO PARA SE OBTER O TERMO E_{POL}	33
4.5.1 – Os conjuntos transmissor e receptor	35
4.5.2 – Linha de visada entre Tx-Rx	35
4.5.3 – Parede de tijolos entre Tx-Rx	37
4.5.4 – Parede de divisória entre Tx-Rx	39
4.5.5 – Porta de madeira entre Tx-Rx	41
4.5.6 – Compensado entre Tx-Rx	42
4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS	47
5.1 – COMENTÁRIOS INICIAIS	47
5.2 – INVESTIGANDO A EFICIÊNCIA DO MODELO PROPOSTO	47

5.2.1 – Prédio anexo	47
5.2.2 – Pavilhão de salas de aula	51
5.3 – QUALIFICADOR DE REDE (QR)	55
5.4 – RESULTADOS DE QR	56
5.4.1 – Prédio anexo	56
5.4.2 – Pavilhão de salas de aula	57
5.5 – RAIOS DE COBERTURA	58
5.6 – ÁREA DE COBERTURA	60
5.6.1 – Prédio anexo	60
5.6.2 – Pavilhão de salas de aula	61
5.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	66

LISTA DE ACRÔNIMOS

ISM	<i>One Slope Model</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
CW	<i>Continuos Waves or Carrier Wave</i>
FAP	Fator de Acoplamento de Polarização
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i>
LEEC	Laboratório de Engenharia Elétrica e Computação
MWF	<i>Multi Wall and Floor</i>
MWM	<i>Multi Wall Model</i>
PA	Ponto de Acesso
PMOS	<i>Pseudo Mean Opinion Score</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RNA	Rede Neural Artificial
Rx	Receptor
SCM	Serviço de Comunicação Multimídia
Tx	Transmissor
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UFPA	Universidade Federal do Pará
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Planta baixa do Anexo, com a localização do Tx e do Rx.	17
FIGURA 3.2	Desacoplamento de polarização em dipolos.	20
FIGURA 3.3	Ilustração do esquema montado para medir a perda em materiais.	22
FIGURA 3.4	Gráfico comparativo da perda de penetração, para a polarização horizontal, quando existe algum obstáculo ou espaço livre entre as antenas Tx e Rx.	23
FIGURA 3.5	Gráfico comparativo da perda de penetração, para a polarização vertical, quando existe algum obstáculo ou espaço livre entre as antenas Tx e Rx.	24
FIGURA 4.1	Fotos do prédio anexo.	27
FIGURA 4.2	Fotos do pavilhão de salas de aulas.	27
FIGURA 4.3	Planta baixa do anexo (a) e do pavilhão de salas de aula (b). Com a localização dos pontos medidos e do ponto de acesso (PA), transmissor do sinal.	28
FIGURA 4.4	Tela do <i>software Network Stumbler</i> .	29
FIGURA 4.5	Rede em estudo.	31
FIGURA 4.6	Carrinho com os <i>notebooks</i> .	31
FIGURA 4.7	Rede montada para esta campanha de medição.	32
FIGURA 4.8	Carrinho com o transmissor das chamadas VoIP e o medidor de potência.	33
FIGURA 4.9	Medição com linha de visada entre Tx-Rx na frequência de 10GHz.	36
FIGURA 4.10	A ilustração da planta baixa do térreo do anexo, colocando em destaque a localização da parede de tijolos utilizada na medição.	38
FIGURA 4.11	Ilustração com a parede de tijolos entre transmissora e a receptora.	38
FIGURA 4.12	Localização (na planta baixa) da divisória utilizada na medição.	39
FIGURA 4.13	Ilustração da parede de divisória entre as antenas.	40
FIGURA 4.14	Ilustração da porta de madeira entre as antenas.	41

FIGURA 4.17	Compensado entre Tx-Rx.	42
FIGURA 4.18	Gráficos comparando as diferentes combinações de polarizações das antenas para cada material entre Tx-Rx.	42
FIGURA 5.1	Planta baixa do andar inferior do prédio anexo.	48
FIGURA 5.2	Potência recebida (dBm) medida e expandida. Com a escala de cores ao lado.	49
FIGURA 5.3	Predição da potência recebida (dBm) realizada pelo modelo de Seidel-Rappaport.	50
FIGURA 5.4	Potência recebida (dBm) predita pelo modelo apresentado em.	50
FIGURA 5.5	Simulação da predição de potência recebida (dBm) realizada pelo modelo com o termo proposto.	51
FIGURA 5.6	Planta baixa do segundo andar do pavilhão de salas de aula onde foram realizadas medições, os números apresentados da abscissa e na ordenada representam as distâncias até o ponto de origem (0,0).	52
FIGURA 5.7	Potência recebida, medida e expandida com a localização do transmissor.	53
FIGURA 5.8	Predição do modelo de Seidel-Rappaport com a localização do transmissor.	53
FIGURA 5.9	Potência recebida predita pelo modelo descrito em [1] com a localização do transmissor.	54
FIGURA 5.10	Predição realizada pelo modelo proposto neste trabalho com a localização do transmissor.	54
FIGURA 5.11	Valores de QR para alguns parâmetros de QoS. Considerando, ou não, o efeito da polarização.	57
FIGURA 5.12	Valores de QR para alguns parâmetros de QoS. Considerando, ou não, o efeito da polarização. Para o pavilhão de salas de aula.	58
FIGURA 5.13	Raio de cobertura do PA considerando, ou não, o efeito da polarização. A abscissa representa a distância até o PA.	59
FIGURA 5.14	Raio de cobertura do PA considerando, ou não, o efeito da polarização. A abscissa representa a distância até o PA.	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Valores para o índice de desvanecimento (Método 1SM).	8
TABELA 2.2	L_{wi} para tipos diferentes de paredes e diversas frequências.	10
TABELA 2.3	Tipos de Paredes.	11
TABELA 3.1	Perda de penetração média.	24
TABELA 4.1	Características das antenas cornetas utilizadas.	34
TABELA 4.2	Fotos das antenas utilizadas	35
TABELA 4.3	Intensidade recebida na situação de linha de visada entre Tx-Rx (dBm).	37
TABELA 4.4	Resultados das potências recebidas (dBm).	39
TABELA 4.5	Potência recebida, em dBm, para uma potência transmitida de 10dBm.	40
TABELA 4.6	Resultados da potência recebida (dBm), para cada conjunto de polarizações e para uma porta de madeira como obstáculo.	41
TABELA 4.7	Resultados da potência recebida (dBm).	42
TABELA 4.8	Perda obtida para cada material/frequência medidos	44
TABELA 5.1	Valores dos parâmetros de QoS requeridos para VoIP.	55
TABELA 5.2	Valores de QR para alguns parâmetros de QoS.	56
TABELA 5.3	Valores de QR para alguns parâmetros de QoS.	57
TABELA 5.4	Porcentagem da área de cobertura que atende cada parâmetro de QoS.	60
TABELA 5.5	Porcentagem da área de cobertura que atende cada parâmetro de QoS.	61

RESUMO

Uma das principais aplicações de ondas eletromagnéticas, na atualidade, na área de telecomunicações trata dos enlaces em sistemas móveis sem fio. Sejam estes terrestres (*indoor/outdoor*) ou via satélites, o projetista do sistema de telecomunicações tem que ser capaz de determinar os sistemas irradiantes, as potências envolvidas, a frequência de operação do sistema, a área de cobertura e os parâmetros de qualidade do serviço.

O planejamento das novas redes de comunicações sem fio representa um grande desafio ao incluir serviços cada vez mais avançados com diferentes requisitos de qualidade, suporte a mobilidade, altas taxas de transmissão e capacidades elevadas de tráfego. Os diversos ambientes nos quais essas redes operam, os fenômenos associados produzem diversos efeitos no comportamento do sinal recebido e, conseqüentemente, uma variação no desempenho do enlace de comunicação entre os pontos de acesso, a rede e os usuários. Por conseguinte, esses efeitos devem ser avaliados corretamente, de tal forma que o dimensionamento da rede atenda aos requisitos de qualidade regulamentados.

O presente trabalho objetiva estabelecer uma metodologia para o planejamento de redes de comunicação sem fio para ambientes *indoor*, considerando os parâmetros de qualidade de serviços e os efeitos da polarização das antenas. Foi proposto um modelo empírico para determinar a área de cobertura desse ambiente a partir de uma abordagem baseada em medições.

Como resultado de campanhas de medições, foram identificados os principais parâmetros que interferem nas perdas no enlace de propagação, destacando-se os materiais envolvidos no ambiente bem como os efeitos da polarização das antenas transmissora, entre outros. Tais efeitos, avaliados corretamente, permitirão ao projetista da rede, de uma forma crítica e com base em dados obtidos em campo, definir a melhor configuração de parâmetros e critérios de projeto para a implantação de uma rede móvel de acesso sem fio. As medições para determinação dos parâmetros de cobertura e de qualidade de serviços foram realizadas no prédio do Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação e no prédio de aulas do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará. Nas campanhas de medição foram utilizadas algumas frequências, escolhidas devido à importância dos serviços disponibilizados: 2,4 GHz - redes locais sem fio (WLAN's); 3,5 GHz - Wimax licenciado; 5,85 GHz - Wimax livre e 10 GHz (a faixa de 9,8 a 10 GHz não está ainda regulamentada, de 10 - 10,15 GHz-radioamador (Resolução Anatel, Nº 452/2006 - D.O.U. de 20.12.2006) ou serviços de comunicações multimídias (SCM) para sistemas em banda larga). Os principais

resultados obtidos com o modelo proposto foram avaliados e comparados com os principais modelos da literatura e mostraram que a metodologia adotada para o planejamento de redes de comunicação sem fio em ambientes *indoor* teve um bom desempenho.

PALAVRAS-CHAVES

Ambientes *indoor*; modelos empíricos de perda de propagação; Qualidade de Serviço (QoS); parâmetros de QoS; Polarização de antena.

ABSTRACT

A major application of electromagnetic waves, presently, in the area of telecommunications concern to links of wireless mobile systems. Be these terrestrial ones (indoor/outdoor) or via satellite, the designer of the telecommunications system must be able to determine the irradiate systems, the powers involved, the operation frequency of the system, the coverage area and the quality of service parameters.

The planning of new wireless communications networks represents a great challenge to include advanced services with different quality requirements, the mobility support, high transmission rates and high traffic capacity. The several environments in which those networks operate and the associated phenomena produce several effects on the behavior of the received sign and, consequently, a variation in the performance of the communication link among the points of access to net and the users. Consequently, those effects should be appraised correctly, in such a way that the network dimensioning assists to the quality requirements regulated.

The present work aims to establish a methodology for the planning of wireless networks for environments indoor, considering the parameters of the quality of services and the effects of the polarization of the antennas. An empiric model is proposed to determine the coverage area of that environment from an approach based in measurements.

As a result of measurement campaigns, they were identified the main parameters that interfere in the losses in the propagation link. Standing out the materials involved in the environment as well as the polarization effects of the transmitter's antennas, among others. Such effects, if evaluated correctly, they will allow to the planner's net, in a critical way and with base in data obtained in field, to define the best parameters of configuration and project criteria for the implantation of a wireless mobile network. The measurements for determination of the covering parameters and of quality of services they were accomplished at the building of the Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação and in the classes building of the Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará. The measurement campaigns were used some frequencies, chosen due to the importance of the services available: 2,4 GHz - local nets without thread (WLAN's); 3,5 GHz - licensed WiMAX; 5,85 GHz - free WiMAX and 10 GHz (9,8 to 10 GHz band is not yet regulated, 10 - 10,15 GHz Amateur radio band (Anatel resolution, N^o. 452/2006 - D.O.U. from 20.12.2006) or multimedia communications services (SCM) for broadband systems). The main results

obtained with the proposed model were evaluated and compared with the main models of the literature and showed that the methodology adopted for the networks planning of wireless communications in indoor environment had a good performance.

KEYWORDS

Indoor coverage, empirical propagation loss models, Quality of Service (QoS), QoS parameters, antenna polarization.

Capítulo 1

Introdução

1.1– Caracterização do Problema

Os serviços que utilizam sistemas sem fio têm crescido muito ultimamente alguns exemplos são: redes celulares, redes locais sem fio (WLAN's), redes WiMAX, entre outros, sendo que cada vez mais essas redes estão mais complexas, devido ao aumento do número de serviços oferecidos ao usuário. Os telefones celulares, por exemplo, há muito tempo deixaram de ser usados apenas para conversas telefônicas, devido aos inúmeros serviços que são capazes de oferecer: rádio; televisão; acesso à internet; entre outros. Por isso, a área de cobertura do sinal (potência suficiente para se conectar a rede) deve ser mais abrangente, pois o usuário deseja se conectar em qualquer lugar. Além disso, o usuário não se importa com o nível do sinal, a polarização da antena e o meio físico. O que importa é estar conectado e com qualidade de serviço, ficando a cargo da engenharia se preocupar e procurar a melhor forma desses fenômenos serem indiferentes para o usuário.

Então, com o crescimento dos sistemas sem fio (capazes de permitir grande mobilidade ao usuário) aumentou o interesse em se estudar melhor os efeitos da perda de propagação do sinal. Existem na literatura vários modelos e técnicas de predição de perda do sinal (alguns desses modelos e técnicas são apresentados no Capítulo 2) para ambientes abertos (*outdoors*) e fechados (*indoors*).

Sabe-se que ter somente um bom nível de potência recebida não garante que o serviço tenha um bom desempenho. Para isso, devem ser analisados vários outros parâmetros, tais como: *jitter*, atraso de pacotes, perda de pacotes e PMOS, que são definidos no Capítulo 3. Os parâmetros citados fazem parte de um grupo que indica a qualidade da rede, denominado QoS (Qualidade de Serviço).

1.2– Motivação

A grande motivação deste trabalho advém do enorme sucesso que as comunicações sem fio vêm experimentando nos últimos anos. Esse sucesso é devido, em parte, aos

inúmeros serviços oferecidos e à grande mobilidade permitida ao usuário. Isso permite ao usuário acessar a rede em qualquer lugar, em qualquer posição e em qualquer instante. Para permitir essa liberdade ao usuário é que foi pensado em uma metodologia para se determinar a área de cobertura oferecida por um transmissor localizado no interior de um prédio. Essa área de cobertura se refere aos locais do prédio onde é possível obter um nível de potência suficiente para se conectar a rede e com parâmetros de QoS (qualidade de serviço) suficientes para se ter um desempenho razoável. Para se analisar os níveis de potência existem, na literatura especializada, vários modelos e técnicas que descrevem a perda do sinal em ambientes fechados (*indoor*), mostrados no Capítulo 2.

Há duas técnicas de grande precisão denominadas de traçado de raios (*Ray Tracing*) e diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), entretanto, essas técnicas necessitam de bastante informações sobre o ambiente a ser estudado (os materiais de construção de paredes, pisos e tetos, informações sobre as mobílias, etc.), além de ser necessário, dependendo do algoritmo utilizado, um grande “esforço computacional” para prever a perda de propagação no ambiente em estudo. Existem, além das técnicas citadas, os modelos de predição empíricos, ou seja, estuda-se o ambiente através da medição do sinal. Instala-se um transmissor no ambiente em questão e fazem-se medições do sinal recebido ao longo do local. A partir dos dados obtidos na medição, após serem tratados e observados, propõe-se uma equação que descreva essa perda de propagação. Esses modelos não apresentam grande precisão. A precisão aumenta com o aumento de componentes da equação/modelo.

1.3– Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para se determinar a área de cobertura de um ambiente fechado. Entende-se por área de cobertura a região do prédio em estudo onde se poderá conectar a rede desejada (celular, wlan, etc) com nível de potência e parâmetros de QoS suficientes.

1.4– Contribuições

Em 2009 a professora Simone Fraiha apresentou na sua tese de doutorado um novo modelo empírico para predição de perda de propagação em ambiente *indoor* [1]. Esse

modelo foi obtido a partir de várias campanhas de medição realizadas. O modelo proposto neste trabalho tem como diferença principal àquele apresentado pela professora Simone, a consideração da posição da antena do receptor, em relação à posição da antena do transmissor, ou seja, considera-se neste trabalho o efeito das polarizações das antenas transmissora e receptora. Conforme observado, esse efeito influencia consideravelmente na avaliação do desempenho da rede.

Para realizar este estudo, várias campanhas de medição foram realizadas em algumas frequências, escolhidas devido à importância dos serviços disponibilizados: 2,4 GHz - redes locais sem fio (WLAN's); 3,5 GHz - WiMAX licenciado; 5,85 GHz - WiMAX livre e 10 GHz (a faixa de 9,8 a 10 GHz não está ainda regulamentada, de 10 - 10,15 GHz - radioamador (Resolução Anatel, Nº 452/2006 - D.O.U. de 20.12.2006) ou serviços de comunicações multimídias (SCM) para sistemas em banda larga).

E, posteriormente ao tratamento dos dados obtidos nas campanhas de medição e da análise dos dados, é proposto mais um termo ao modelo apresentado pela professora Simone Fraiha.

Resumindo, podem ser listadas as seguintes contribuições deste trabalho:

- *Procedimentos de medição* – são descritos os procedimentos de medição para obtenção do nível de potência recebida em uma área fechada;
- *Modelo proposto* – é proposto um modelo empírico, baseado em medições realizadas de perda de propagação, incluindo o efeito da polarização;
- *Área de cobertura* – utilizando o procedimento descrito, juntamente com o modelo apresentado, é possível obter a área em que o usuário vai conseguir potência suficiente para se conectar a rede;
- *Qualidade de Serviço (QoS)* – são definidos e medidos, com o procedimento de medição descrito, alguns parâmetros de qualidade de serviço necessários para se ter uma conexão com bom desempenho;
- *Efeito da polarização com a presença dos materiais* – é descrito como se obter esse efeito e para alguns materiais (utilizados na construção de prédios, por exemplo) é apresentado o quanto eles afetam a perda de um sinal ao atravessá-los, dependendo das polarizações das antenas;

- *Análise do desempenho de uma rede de teste* – Com base nos resultados obtidos, em relação à potência recebida e os parâmetros de QoS, é possível obter a área de cobertura dentro de um ambiente fechado.

1.5 – Organização deste trabalho

O Capítulo 2 apresenta alguns modelos existentes na literatura que predizem, com maior ou menor precisão, a perda de propagação em ambientes fechados.

O Capítulo 3 descreve o modelo proposto neste trabalho.

O Capítulo 4 descreve os ambientes e a metodologia que foram utilizados nas campanhas de medição que foram realizadas para se chegar ao modelo proposto neste trabalho, incluindo as campanhas realizadas para se chegar ao termo que considera o efeito da polarização.

O Capítulo 5 mostra as comparações de predição do modelo, com e sem o termo referente ao efeito da polarização, sempre comparando com as medições realizadas e com os resultados preditos por alguns dos modelos empíricos apresentados no Capítulo 2. Não somente as predições de potência são mostradas, mas também, as predições dos fatores de QoS, incluindo a predição do raio e da área de cobertura dos prédios medidos.

Ao final, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Capítulo 2

Modelos de Perda de Propagação para Ambiente *Indoor*

Existem várias técnicas para prever a potência que chegará a um receptor, depois de ser afetado pelos diversos mecanismos de propagação existentes no ambiente em questão [2]. Existem as técnicas de predição determinísticas, tais como: traçado de raios, diferenças finitas no domínio do tempo, entre outras. E existe, também, a técnica de se obter uma equação para descrever a potência que chegará ao receptor, através de campanhas de medições realizadas, chamada de modelo empírico.

Cenários interiores (*indoor*) apresentam características singulares, como alta densidade de tráfego, cobertura definida pela forma e quantidade de objetos nos ambientes, qualidade de serviço afetada pela presença de móveis e pessoas, etc., razões pelas quais os modelos usados em outros tipos de cenários não podem ser aplicados, necessitando-se de modelos específicos [3]. Este capítulo faz uma apresentação resumida das técnicas utilizadas para prever a perda de potência experimentada pelo sinal ao sair do transmissor até a sua chegada no receptor. As técnicas determinísticas são explicadas de forma geral, porém, as técnicas, ou modelos, empíricos são descritas com mais detalhes. Na realidade, são apresentados alguns modelos de predição empíricos [4]. Os modelos de predição empíricos são vistos com mais detalhes porque o modelo que é apresentado neste trabalho também é empírico.

2.1 - Modelos Determinísticos

Os modelos de predição de perda de propagação *indoor* do tipo determinísticos utilizam, basicamente, as técnicas de traçado de raio e da teoria geométrica de difração. Isso pode ser usado para a predição em locais específicos, contanto que detalhes suficientes da geometria do prédio e do material de construção do mesmo estejam disponíveis. Técnicas de predição eletromagnéticas mais avançadas, tal como diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) são também utilizadas em alguns casos. Tais técnicas também fornecem informação de banda larga e estatística de propagação multipercursos. Entretanto,

existem algumas limitações no uso dessas técnicas, devido à dificuldade de se obter informações suficientemente precisas dos ambientes estudados. Quando se obtém essas informações, entretanto, essas técnicas são extremamente precisas. Porém, elas podem requer um tempo para o processamento das informações e obtenção de resultados extremamente grande é o chamado “esforço computacional”.

2.1.1 – Técnica de Traçado de Raios

A técnica de traçado de raios utiliza o princípio da óptica geométrica, onde os raios diretos e refletidos são considerados ao longo do percurso de propagação do transmissor ao receptor sendo assim, o algoritmo de traçado de raios calcula todos os possíveis percursos do sinal do transmissor até o receptor. Outros algoritmos de traçado de raios mais complexos incluem o mecanismo de difração e transmissão através de vários materiais. Deste modo, através da técnica de traçado de raios, o nível do sinal em um determinado local pode ser obtido pela soma das componentes de todos os percursos entre o transmissor e o receptor. Além das perdas de propagação, o tempo de dispersão do sinal também pode ser predito pela técnica de traçado de raios [5].

Atualmente a técnica de traçado de raios é considerada a técnica de predição de intensidade de campo mais confiável. Entretanto, essa técnica requer um *layout* detalhado da área a ser analisada. A precisão da técnica depende da precisão e da complexidade do banco de dados do *layout* da área. Porém, uma desvantagem dessa técnica é a necessidade de uma grande capacidade de processamento computacional. O “esforço computacional”, entretanto, depende exponencialmente dos detalhes incluídos no *layout* da área.

Os algoritmos de traçado de raios podem, também, ser usados para predição de ambientes *outdoors*, porém em áreas pequenas.

2.1.2 – Técnica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

As características de propagação de ondas de rádio podem ser observadas através da solução das equações de Maxwell para a propagação de ondas eletromagnéticas. O método FDTD é um dos mais conhecidos métodos numéricos para a solução das equações de

Maxwell. Nesse método, as equações de Maxwell são aproximadas através de um conjunto de equações de diferenças finitas. Primeiramente, para a realização dos cálculos é necessário definir uma malha específica (regular ou irregular) sobre a área de interesse [5]. Após a definição dessas condições iniciais, o algoritmo FDTD utiliza diferenças centrais para aproximar ambas as derivadas temporal e espacial. Nos nós da malha, as soluções são determinadas iterativamente. Desse modo, as equações de Maxwell são resolvidas diretamente.

Assim como a técnica de traçado de raios, a técnica FDTD também necessita de uma grande capacidade de processamento computacional. O tempo computacional depende proporcionalmente do tamanho da área que será analisada e do detalhamento do ambiente envolvido. Entretanto o número de nós da malha está exponencialmente relacionado com o tamanho da área e com a frequência de operação. A precisão da predição da técnica FDTD depende do detalhamento do banco de dados do *layout* da área. Devido a sua complexidade computacional, a técnica FDTD é usada somente para tarefas de predição em áreas pequenas.

As técnicas determinísticas citadas neste trabalho, técnica de traçado de raios e técnica de diferenças finitas no domínio do tempo, baseiam-se em métodos numéricos, teoria eletromagnética e informações digitalizadas da região em análise, sendo necessário um grande esforço computacional por isso, possuem alta precisão na predição *indoor* maior do que a apresentada pelos modelos empíricos entretanto, elas necessitam de uma grande fonte de detalhamento quanto à descrição do ambiente a ser modelado, ou seja, necessita de informações sobre a localização de todos os objetos presentes no ambiente e suas dimensões [6].

2.2 – Modelos Empíricos

São apresentados os principais modelos empíricos disponíveis na literatura para cobertura em ambientes fechados. Esse tipo de modelo apresenta uma equação para descrever a perda de propagação. Essa equação é obtida a partir da análise dos resultados de campanhas de medição realizadas no ambiente de interesse. Em sua maioria, essas equações consideram a perda no espaço-livre, somada às perdas em pisos e paredes para

descrever a perda em um ambiente fechado. Esse tipo de aproximação acarreta em imprecisão no modelo. Porém, a sua facilidade de implementação é muito grande, uma vez que é definido através de uma equação simples. A seguir alguns modelos empíricos são apresentados.

2.2.1 – Modelo *One Slope* (ISM)

Considera uma dependência linear entre a perda de percurso (dB) e o logaritmo da distância.

$$L = L_0 + 10n \cdot \log(d) \quad (2.1)$$

sendo:

L_0 : perda de percurso na distância de 1m;

n : expoente de perda;

d : distância entre o transmissor e o receptor (em metros).

Esse modelo é fácil de ser usado porque os únicos parâmetros de entrada são a distância entre o transmissor e o receptor e o expoente de perda, mas não é muito preciso [7].

Alguns valores para n são apresentados na Tabela 2.1 [3].

TABELA 2.1: Valores para o índice de desvanecimento (Método ISM) [3].

Cenário	n	Mecanismos de propagação dominantes
Corredor	1,4 – 1,9	Onda guiada
Quartos grandes e vazios	2	Visada direta (LOS – <i>line of sight</i>)
Quartos mobiliados	3	LOS + Multipercurso
Quartos densamente mobiliados	4	Espalhamento por obstáculos, sem linha de visada direta.
Multi-andar	5	Atenuação em paredes e pisos

2.2.2 – Modelo Motley-Keenan

O modelo Motley-Keenan [8] considera que a perda média por multipercurso é a perda no espaço-livre, na distância considerada, somada à perda em cada obstáculo (parede) entre o transmissor e o receptor. Inicialmente, este modelo considerava somente paredes de um mesmo material (L_{wi}), tendo sido feitas modificações de forma a considerar paredes de tipos diferentes (F_{wall}) e o piso (F_{floor}), permitindo obter melhores resultados [3].

Versão inicial do modelo:

$$L(d) = L_0 + \sum_{i=1}^I L_{wi} \quad (2.2)$$

onde:

L_0 : perda de percurso no espaço-livre na distância de referência;

L_{wi} : perda em paredes.

Versão modificada do Modelo:

$$L(d) = L_0 + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sum F_{wall} + \sum F_{floor} \quad (2.3)$$

sendo:

$L_0(d)$: perda de percurso no espaço-livre na distância de referência;

n : expoente de perda;

d_0 : distância de referência, normalmente 1 metro;

$\sum F_{wall}$: somatório de perdas em paredes, incluindo tipos diferentes de paredes;

$\sum F_{floor}$: somatório de perdas em pisos.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns valores de atenuação (L_{wi}) para os tipos mais comuns de paredes [3].

TABELA 2.2: L_{wi} para tipos diferentes de paredes e diversas frequências [3].

Obstáculo	1,8 GHz	2,4 GHz	5,2 GHz
Concreto espesso (sem janela)	13 dB	17 dB	36 dB
Vidraça	2 dB	13 dB	15 dB
Parede com janela (valor exato depende da razão entre áreas de janelas e de concreto)	2 a 13 dB	13 a 17 dB	15 a 36 dB

2.2.3 - Modelo do Fator de Piso e Parede

Existem modelos que descrevem as perdas em várias paredes e pisos simplesmente multiplicando o número de pisos/paredes pela perda em cada piso/parede individualmente. No Modelo do Fator de Piso e Parede [7] a perda total nos pisos e paredes é descrita dessa forma, ou seja, ele não considera tipos diferentes de paredes e pisos. A equação (2.4) descreve esse modelo.

$$L = L_0 + 20 \log d + n_f a_f + n_w a_w \quad (2.4)$$

Sendo L_0 a perda na distância de referência, normalmente 1 m. A perda com a distância tem expoente de perda fixado em 2 (como no espaço-livre). As perdas relacionadas com os pisos e paredes atravessadas são apresentadas nos outros termos do modelo. Onde a_f e a_w são fatores de atenuação (em dB) por piso e por parede, respectivamente, n_f é número de pisos e n_w é o número de paredes interceptadas pela distância em linha de reta (d) entre os terminais transmissor e receptor.

O que se verifica na prática, entretanto, é que esse tipo de modelo apresenta uma imprecisão muito grande, pois, superestima a perda efetiva entre o transmissor e o receptor [7].

2.2.4 – Modelo de Multi-Parede/Piso (MWM) - COST231

Alguns modelos sugerem que a perda total apresentada por N pisos/paredes seja, na realidade, uma função da perda em cada piso/parede individual. Para exemplificar pode-se citar o modelo Multi-paredes COST231 [7], que considera a perda em paredes/pisos de materiais diferentes como uma função do número de paredes/pisos entre o transmissor e o receptor. Esse modelo tem sua formulação matemática mostrada a seguir:

$$L = L_F + L_C + \sum_{i=1}^W L_{wi} n_{wi} + L_f n_f \left[\frac{n_f + 2}{n_f + 1} - b \right] \quad (2.5)$$

Sendo L_F a perda no espaço-livre, considerando um percurso direto entre o transmissor e o receptor, n_{wi} é o número de paredes do tipo i que estão sendo atravessadas, W é o número de tipos diferentes de paredes, L_{wi} é a perda em cada parede do tipo i , n_f é o número de pisos atravessados, L_f é a perda em cada piso, b é uma constante empírica que serve para ajustar o modelo a cada ambiente, L_C é um termo que resulta quando as perdas nas paredes são determinadas dos resultados de medições, usando a regressão linear múltipla. Normalmente é próximo de zero [9].

Em relação à perda em paredes, é proposta uma divisão de dois tipos de paredes como mostrado na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Tipos de Paredes [9], [3].

Tipo de Parede	L_{wi}	Descrição
Fina	3,4 dB	Parede divisória (não suporta carga) por exemplo: lâminas de gesso, tábuas de madeira ou paredes finas de concreto (< 10 cm).
Grossa	6,9 dB	Uma parede de sustentação ou parede de espessura maior (> 10 cm), construída de, por exemplo, concreto ou tijolo.

É importante notar que os fatores de perda não são fatores físicos, mas coeficientes que são otimizados de acordo com os dados medidos da perda de percurso. Consequentemente, os fatores de perda incluem, implicitamente, os efeitos das mobílias, assim como o efeito do sinal guiado através de corredores [9].

O modelo COST231, portanto, apresenta como vantagem em relação à maioria dos outros modelos, o fato de considerar a possibilidade de se ter paredes de tipos diferentes em um mesmo ambiente, tais como: madeira, tijolos, divisórias, etc.

2.2.5 – Modelo de Multi-Paredes e Pisos - MWF

Em [11] e [12] os autores fizeram campanhas de medições para estudar a perda de penetração em situações onde o transmissor está no lado de fora do prédio. O objetivo é analisar o isolamento entre prédios que utilizam a mesma faixa de frequência no projeto de WLAN's. A partir das medições, os autores concluem que a perda em paredes segue uma função não linear do número de paredes, de tal forma que a perda na primeira parede da mesma categoria (mesmo material e espessura) é sempre maior que as perdas das paredes posteriores. A função encontrada é dada por:

$$L_w = L_s n_s \left[\frac{n_s + 5}{n_s + 3} - b \right] \quad (2.6)$$

Sendo L_s a perda média por parede, n_s o número de paredes atravessadas e b uma constante empírica que deve compensar a perda quando n_s for grande.

Em [12] é proposto um modelo de perda denominado de Multi-Paredes e Pisos (MWF), dado por:

$$L_{MWF} = L_0 + 10n \log(d) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_{wi}} L_{wik} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_{fj}} L_{fjk} \quad (2.7)$$

sendo:

L_0 : perda de propagação em $d = 1$ m;

n : expoente de perda;
 d : distância, em metros, entre transmissor e receptor;
 L_{wik} : atenuação devido à k -ésima parede do tipo i atravessada;
 L_{fjk} : atenuação devido ao k -ésimo piso do tipo j atravessado;
 I : número de tipos diferentes de paredes;
 J : número de tipos diferentes de pisos;
 K_{wi} : número de paredes atravessadas do tipo i ;
 K_{fj} : número de pisos atravessados do tipo j .
 Portanto, a equação (2.6) seria o L_{wik} existente em (2.7).

2.2.6 – Modelo de Seidel-Rappaport

Este modelo inclui os efeitos dos pisos e paredes existentes entre o transmissor e o receptor [13]:

$$L(d)[dB]=L(d_0)[dB]+10n_{SF} \log\left(\frac{d}{d_0}\right)+FAF[dB]+\sum PAF[dB] \quad (2.8)$$

Sendo $L(d_0)$ a perda apresentada a uma perda na distância d_0 entre Tx-Rx, n_{SF} representa o valor do expoente de perda para o mesmo andar (*same floor*). FAF representa um fator de atenuação para um número específico de pisos entre Tx-Rx. Quando o raio, em 3D, entre o Tx-Rx encontra uma obstrução, o mesmo apresenta uma atenuação, que pode ser representada por PAF .

2.3 – Considerações Finais

Então, concluindo, têm-se modelos de predição de perda de propagação que são altamente precisos (chamados de modelos determinísticos), porém, demoram mais tempo na predição, ou seja, é grande o “esforço computacional” necessário para realizar a predição, isso com computadores de boa capacidade de processamento. Esses modelos também têm restrições quanto aos locais de predição, que não devem possuir muitos detalhes de construção e quanto maior a diversidade dos materiais utilizados na sua construção e mobília, mais difícil se torna essa predição. Existem, também, modelos

(chamados de modelos empíricos) que são mais simples e de mais fácil implementação, fornecendo maior rapidez na predição. Entretanto, esses modelos não são tão precisos, apresentando valores aproximados de perda.

No Capítulo 3 é apresentado o modelo proposto para predição de enlaces em ambiente *indoor* que incorpora características de uma boa precisão inerentes dos modelos determinísticos com a facilidade de implementação dos modelos empíricos. Em outras palavras, se tornou mais preciso que os modelos empíricos comparados e mais fácil de implementar que os determinísticos.

Capítulo 3

Modelo Proposto

3.1 – Introdução

O modelo apresentado pela professora Simone Fraiha em 2009[1], será visto em detalhes neste capítulo, assim como os termos que foram acrescentados para este trabalho. Esse modelo, que utiliza a aproximação de Padé, apresenta uma melhora na precisão dos modelos empíricos de predição de perda de propagação em ambiente *indoor*. Sendo elaborado a partir da análise e tratamento dos dados obtidos em diversas campanhas de medição, incorporando características do ambiente e um termo que inclui a Qualidade de Serviço (QoS).

O modelo aqui proposto é baseado no modelo apresentado em [1], acrescentando um termo que considera o efeito da polarização das antenas transmissora e receptora. Objetiva-se com isso avaliar o desempenho de uma rede sem fio em um ambiente *indoor* considerando esse novo parâmetro e sua influência relativa na área de cobertura e na qualidade de serviço.

3.2 – Modelo Proposto

A fórmula geral do modelo proposto é apresentada a seguir e é composta por três termos: um representando as perdas gerais do ambiente; outro representando as métricas de Qualidade de Serviço (QoS) e o último termo, representando o efeito da polarização das antenas.

$$PL = \left. \begin{array}{l} PL_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + f(n_p; a, b) \\ ou \\ QoS(n_p; a', b', c', e') \end{array} \right\} + E_{pol} \quad (3.1)$$

3.2.1 – Termo das perdas gerais

Este termo é dado pela expressão $PL = PL_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + f(n_p; a, b)$, que considera as não-homogeneidades do ambiente através do termo empírico ($f(n_p; a, b)$), que é uma função do número de pisos e paredes e também da perda em cada um desses obstáculos (n_p), e dos parâmetros de ajuste a e b , sendo ainda:

L_0 : perda no espaço-livre na distância de referência;

n : coeficiente de perdas;

d : distância entre transmissor e receptor (m);

d_0 : distância de referência (normalmente 1 metro);

$f(n_p; a, b)$: uma aproximação de Padé.

Essa aproximação de Padé é descrita pela seguinte fórmula:

$$f(n_p; a, b) = \frac{a + \frac{abn_p}{2} + \frac{1}{12}ab^2n_p^2}{1 - \frac{bn_p}{2} + \frac{b^2n_p^2}{12}} \quad (3.2)$$

Na aproximação de Padé [14], [15], os parâmetros de ajuste a e b são calculados por uma rotina de mínimos quadrados não-lineares, que ajusta o modelo aos dados medidos. A variável n_p , é obtida a partir da somatória das perdas inseridas por cada obstáculo situado entre o transmissor e o receptor.

$$n_p = \sum_{i=0}^N L_{fi} + \sum_{j=0}^M L_{wj} \quad (3.3)$$

sendo:

L_{fi} : perda em cada piso existente entre o Tx e o Rx;

L_{wj} : perda em cada parede existente entre o Tx e Rx.

N e M representam o número de pisos e paredes, respectivamente, localizados entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx). Esses pisos e paredes podem ser de materiais de construção diferentes.

Na Figura 3.1 está destacado um exemplo das localizações do transmissor (Tx) e do receptor (Rx). Um programa computacional desenvolvido para a simulação do modelo encontra a menor distância entre Tx e Rx e verifica se há, nessa trajetória, algum obstáculo (parede ou piso) e o tipo desse obstáculo (material de construção) e, a partir daí, que perda ocorre no sinal ao atravessar tal obstáculo. Essa perda pode ser encontrada na literatura [16] ou, como feito neste trabalho, através de medições em materiais do tipo madeira, tijolo, compensado e divisórias navais. Obtendo o número de obstáculos e o seu tipo, o programa computacional efetua a soma das perdas e fornece o valor final de n_p .

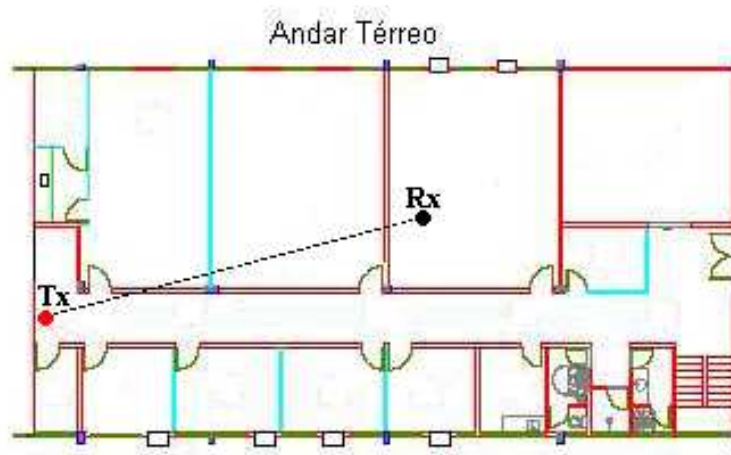


Figura 3.1 – Planta baixa do Prédio Anexo, com a localização do Tx e do Rx.

O prédio anexo é descrito no capítulo 4. Esse prédio foi um dos utilizados para se medir potência recebida e padrões de QoS.

3.2.2 – Termo das métricas de QoS

Com o aumento do número de serviços em redes sem fio, os sistemas celulares são um bom exemplo desse aumento de serviços. Somente um bom nível de potência não é mais suficiente para garantir um bom desempenho na conexão do seu equipamento (telefone celular, *Ipod*, *notebook*, etc.) à rede em questão. Existem alguns outros parâmetros que servem para medir a qualidade da conexão. É através dos valores desses parâmetros que se mede a chamada qualidade de serviço (QoS) da rede, que nada mais é do que uma indicação do desempenho da rede.

Neste trabalho, são avaliados alguns parâmetros de QoS. A finalidade é mensurar a área de cobertura de um transmissor em ambiente fechado. Essa área de cobertura deve possuir um bom nível de potência recebida, para garantir a conexão com a rede, e deve ter, também, bom nível de QoS para garantir o desempenho da conexão.

3.2.2.1- Parâmetros de QoS

Para se medir alguns dos parâmetros de QoS foi utilizado o serviço VoIP (Voz sobre IP), que é um dos serviços mais críticos, ou seja, que mais necessita de um bom desempenho da rede. Uma rede ou conexão com baixo desempenho é bem perceptível ao usuário. A seguir serão apresentados alguns parâmetros de QoS:

Jitter

É uma variação estatística do atraso na entrega de dados em uma rede, ou seja, pode ser definida como a medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados. Observa-se ainda que uma variação de atraso elevada produz uma recepção não regular dos pacotes. Um exemplo de serviço que tem o *Jitter* como inimigo é o serviço VoIP. Para esse serviço, o efeito do *Jitter* não é agradável [17].

Perda de Pacotes

Para manter uma boa qualidade da conexão. A perda de pacotes não deve ultrapassar 2%. Esse valor varia de acordo com o serviço que está sendo utilizado. A alta taxa de perda de pacotes irá gerar uma grande quantidade de retransmissões na conexão. O que irá diminuir a velocidade da conexão, piorando o desempenho da rede [18].

PMOS

O PMOS é um parâmetro muito importante quando a informação a ser transmitida é uma conversa, por exemplo. Existem, basicamente, dois métodos de se mensurar a qualidade de voz: método objetivo, método subjetivo. No método subjetivo, várias pessoas ouvem a voz que foi transmitida e pontuam a qualidade do sinal recebido. O resultado é, então, classificado de 1 a 5, sendo 1 um sinal de péssima qualidade e 5 de excelente qualidade. Esse método é caro e consome um tempo considerável. Por isso, criou-se um método objetivo. No método objetivo, tanto se pode utilizar um algoritmo ou cálculos matemáticos para se classificar a qualidade da voz conversa, que foi recebida. Portanto,

PMOS é um *Pseudo Mean Opinion Score*, ou seja, é um algoritmo baseado em cálculos matemáticos que classifica a qualidade do sinal transmitido de 1 a 5 [19].

A variação das métricas de QoS (*jitter*, perda de pacotes e PMOS) com a distância e com o número n_p de “obstáculos” (paredes, divisórias e pisos) entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx) e das respectivas perdas associadas a cada tipo de “obstáculo” é dada por:

$$\begin{aligned} QoS(n_p; a', b') &= a' \text{ distm} + b', & \text{para } n_p = 0 \\ QoS(n_p; a', b', c', e') &= a' n_p^2 + b' n_p + c' \text{ distm} + e', & \text{para } n_p \neq 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$e' = QoS \text{ min}$; a' , b' e c' estimados.

sendo:

a' , b' e c' : parâmetros estimados;

distm : d/d_0

d : distância entre transmissor e receptor (m);

d_0 : distância de referência (m);

e' : valor mínimo da métrica de QoS segundo ITU-T.

O cálculo dos parâmetros a' , b' e c' é realizado por uma rotina de mínimos quadrados não lineares, que ajusta o modelo aos dados medidos.

3.2.3 – Termo do Efeito da Polarização das Antenas

✓ Polarização – Conceito

Uma onda eletromagnética que varia senoidalmente no tempo é caracterizada, no ponto de observação, pela sua frequência, amplitude, fase e polarização. A polarização de uma onda plana é definida no plano que contém o vetor campo elétrico. A referência usual no caso de ondas terrestres é a superfície da Terra. Assim, definem-se ondas horizontalmente polarizadas quando o campo elétrico é paralelo à superfície da terra, ou ondas verticalmente polarizadas quando o campo elétrico é vertical à superfície de referência. Os planos que contém os vetores campo elétrico e magnético são os planos de polarização. O plano de

polarização é perpendicular à direção de propagação da onda plana. Existem três tipos de polarização: linear (vertical ou horizontal); circular e elíptica [20]. No presente trabalho é utilizada, para avaliar o efeito da polarização das antenas, apenas a polarização linear em função dos experimentos realizados.

✓ **O Fator de Acoplamento de Polarização das Antenas (FAP)**

É o relacionamento entre a potência máxima disponível da onda e a potência que a antena pode receber. Assim, para o máximo FAP é necessário que a polarização da antena transmissora esteja em fase com a polarização da antena receptora. Neste caso, diz-se que as antenas estão acopladas em polarização. As perdas por polarização ocorrem quando a polarização da onda transmitida é diferente da polarização da antena receptora. Define-se, então, Ψ como a diferença angular entre as duas polarizações lineares, conforme ilustrado na Fig. 3.2.

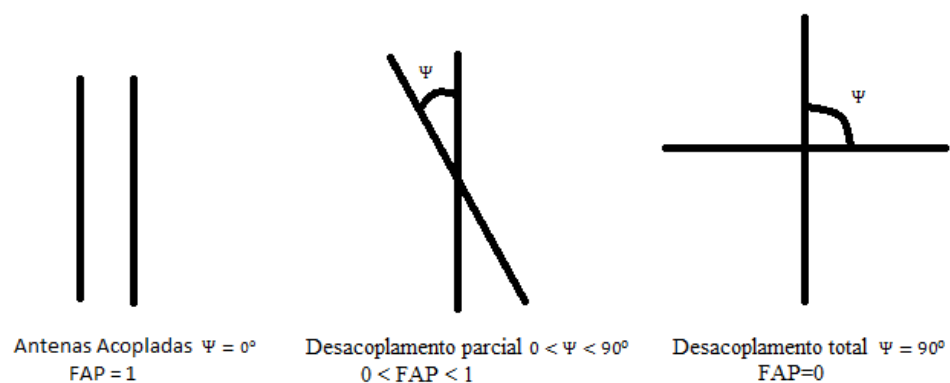


Figura 3.2 – Desacoplamento de polarização em antenas dipolos.

O Fator de Acoplamento de Polarização (FAP) pode ser definido por:

$$FAP = \cos^2 \Psi \quad (3.5)$$

✓ **Medidas de Polarização**

Para se medir o efeito da polarização da antena são utilizadas duas antenas e avaliam-se as características da onda polarizada na região de campo distante. As antenas devem possuir polarização linear; assim, quando uma das antenas for rotacionada para determinar o tipo de polarização, o fator de acoplamento FAP variará de 0 a 1. Desta maneira, foi adotado para este trabalho um FAP igual a zero correspondendo ao desacoplamento máximo das antenas que implicará na maior atenuação do sinal.

✓ **Metodologia para determinação do efeito da polarização**

No presente trabalho foi adotada a seguinte metodologia para calcular esse efeito:

1 – Obtém-se a média aritmética das perdas obtidas quando as antenas estão na mesma polarização (M_1): VV – vertical-vertical e HH-horizontal-horizontal;

2 – Obtém-se a média aritmética das perdas obtidas quando as antenas estão com polarizações diferentes (M_2): VH – vertical-horizontal e HV – horizontal-vertical;

3 – Faz –se a diferença entre M_2 e M_1 .

.

Sendo assim:

$$E_{pol}[dB] = M_2 - M_1 \quad (3.6)$$

Como mencionado, o efeito de polarizações diferentes causa perda de recepção. Uma campanha de medição realizada em 2005 deu início à tentativa de mensurar essa perda, ou seja, determinar qual o efeito quantitativo da polarização. Na próxima seção é apresentada a campanha de medição, que foi a origem desse estudo.

3.3 – Primeira Medição do Efeito da Polarização

Em 2005 foi realizada uma campanha de medição que relacionava a perda apresentada pelo sinal ao atravessar um obstáculo com as polarizações das antenas transmissora e receptora. Essa campanha usava a seguinte metodologia: a antena transmissora, ligada a um gerador de varredura, foi colocada de um lado da parede cuja perda desejava-se medir e no outro lado da mesma foi colocada uma antena receptora ligada a um analisador de espectro. As antenas foram alinhadas e então o gerador de varredura foi ajustado para gerar um sinal CW de potência e frequência iguais a +15 dBm e 900 MHz, respectivamente. Com a antena transmissora fixa, a antena receptora foi deslocada em pequenos passos de 5 cm, aproximadamente, como ilustra a Figura 3.3. A cada distância, a potência recebida era anotada, obtendo-se um total de 40 amostras. As mesmas condições e procedimentos foram repetidos para quando as antenas estavam em linha de visada ou quando existia algum obstáculo entre elas. Os dados medidos nos dois procedimentos foram, então, comparados para se obter a perda de penetração de cada material estudado [21].

Em relação à polarização, o procedimento da medição foi repetido para ambas as antenas na polarização vertical e ambas as antenas na polarização horizontal.

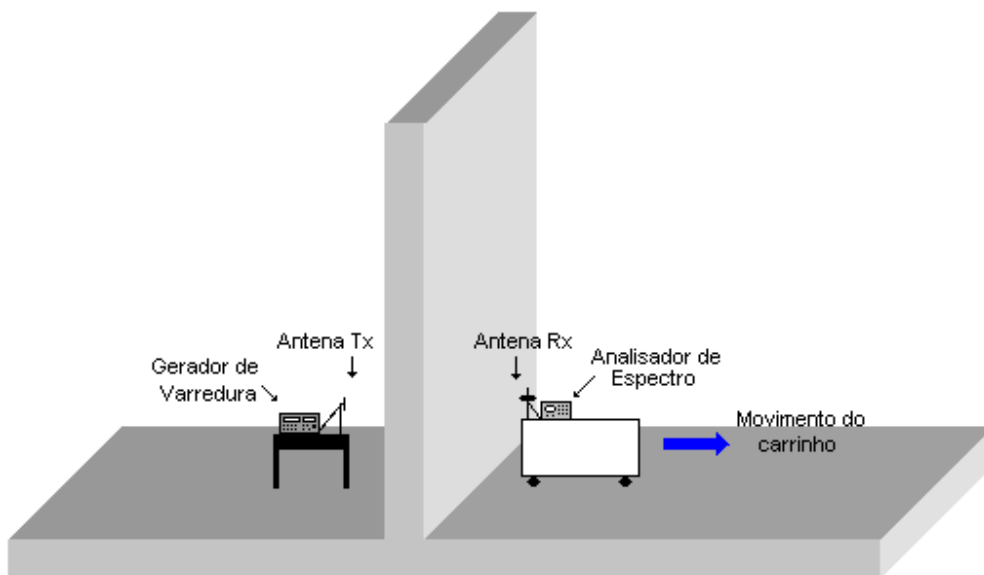


Figura 3.3 – Ilustração do esquema montado para medir a perda em materiais.

As Figs. 3.4 e 3.5 apresentam os gráficos de potência medida *versus* distância transmissor – receptor quando não existe nenhum obstáculo entre as antenas (Linha de visada) e quando há madeira, concreto, argamassa armada ou parede de tijolos como obstáculo à propagação do sinal entre o transmissor e o receptor para as polarizações horizontal e vertical, respectivamente. Observando-se as Figs. 3.4 e 3.5 percebe-se que o material que apresenta a maior perda é a argamassa armada, enquanto que o tijolo apresentou a menor perda.

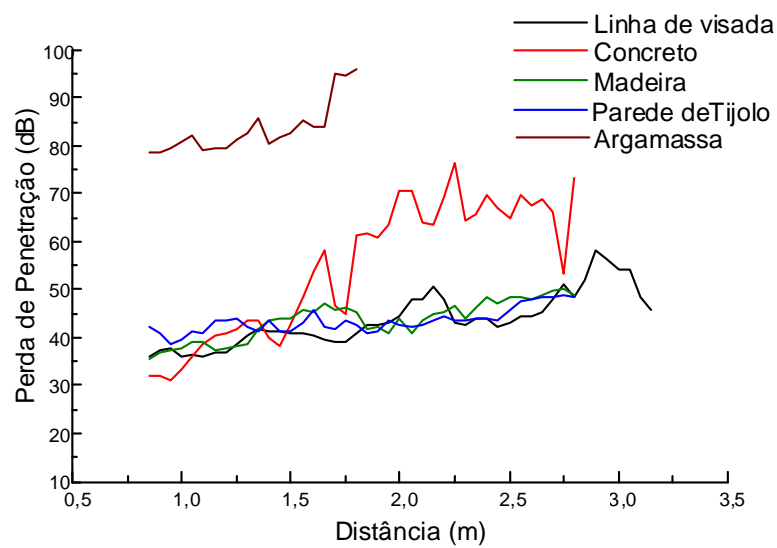


Figura 3.4 - Gráfico comparativo da perda de penetração, para a polarização horizontal, quando existe algum obstáculo ou espaço-livre entre as antenas Tx e Rx.

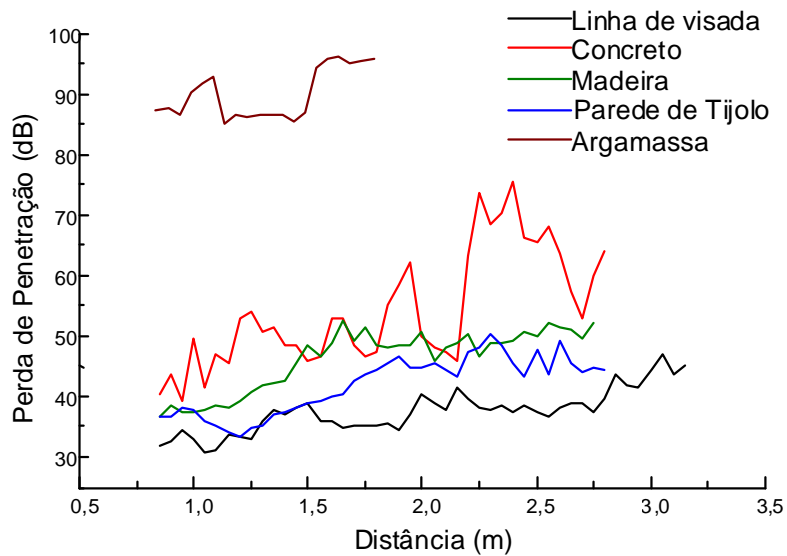


Figura 3.5 - Gráfico comparativo da perda de penetração, para a polarização vertical, quando existe algum obstáculo ou espaço-livre entre as antenas Tx e Rx.

O resumo dos resultados obtidos durante a campanha de medição está mostrado, a título de comparação, na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Perda de Penetração Média.

Material (espessura das paredes ou pisos)	Perda média em relação ao espaço-livre (dB)	
	Polarização Vertical	Polarização Horizontal
Tijolo (36 cm)	5,97	0,97
Madeira (3 cm)	6,11	5,78
Concreto (20 cm)	16,95	13,84
Argamassa Armada (5 cm)	46,09	49,95

Da Tabela 3.1 percebe-se que a perda no tijolo é fortemente influenciada pelo tipo de polarização da onda incidente, isso porque, o tijolo apresenta uma estrutura interna orientada e que, portanto, apresenta um comportamento desigual para as polarizações vertical e horizontal, conforme observado também por Cuiñas e Sánchez [22].

3.4 – Considerações Finais

Apesar dos resultados obtidos estarem de acordo com os obtidos na literatura [21] e [22], eles não são confiáveis, pois, as antenas utilizadas não eram apropriadas para esse tipo de medição. A antena transmissora era dipolo e a antena receptora monopolo, sem apresentarem, portanto, a diretividade necessária para esse tipo de medição. Entretanto mostram que o efeito deve ser melhor avaliado. Desta forma, essa campanha de medição serviu simplesmente para avaliar qualitativamente o efeito da polarização das antenas na perda entre transmissor e receptor. Para uma avaliação quantitativa, outras campanhas de medição foram realizadas e são descritas no Capítulo 4. A partir dos resultados dessas campanhas de medição foram obtidos os valores do efeito das polarizações das antenas, para cada combinação de polarização medida e em cada material medido (parede de tijolo, madeira, divisória, compensado e linha de visada).

Capítulo 4

Campanhas de Medição

4.1 – Introdução

Dentre as várias campanhas de medição já realizadas algumas foram particularmente utilizadas nesta tese. A primeira foi realizada num prédio anexo ao Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação (LEEC) da UFPA. A segunda campanha foi realizada em um prédio (pavilhão) de salas de aula. Ambos os prédios são descritos no decorrer deste capítulo.

Para se chegar ao termo que trata do efeito das polarizações das antenas transmissora e receptora, que é o diferencial do modelo aqui apresentado, foram realizadas outras campanhas que são, também, descritas neste capítulo. A importância da análise deste termo deve-se ao fato do desacoplamento que ocorre se as antenas transmissoras e receptoras apresentarem polarizações diferentes. É importante destacar que não são avaliados neste trabalho os efeitos da despolarização causada por materiais que apresentam efeitos de anisotropias, quando nesse processo, fração da energia eletromagnética escapa do plano original de polarização aparecendo em outros planos [23].

4.2 – Prédio Anexo

Esse prédio tem menos de 10 anos de construção e mede 25 x 12 m. Tem dois andares; no primeiro andar encontram-se salas de professores, laboratórios, uma copa, banheiros, e uma sala vazia que ocupa os dois andares do prédio, onde será instalada futuramente uma câmara anecoica. No segundo andar, há salas de professores, uma pequena sala de reuniões e laboratórios. O prédio é todo construído de tijolos, com algumas paredes internas de divisórias e o piso que divide os andares foi construído de concreto armado. No período da campanha de medição, o prédio estava vazio, por isso, não há perdas em mobílias. A Figura 4.1 apresenta algumas fotos do prédio [24], [25].



Figura 4.1 – Fotos do prédio anexo.

4.3 – Pavilhão de Salas de Aula

Este pavilhão tem mais de 20 anos, 2 andares e foi construído de tijolos e concreto, com uma lateral de janelas de vidros e esquadrias de madeira e a outra lateral com um corredor. O prédio tem dimensão de 40 x 11m, com 6 salas de aula em cada andar, cada sala medindo 6 x 8m. A Figura 4.2 mostra algumas vistas do pavilhão.



Figura 4.2 – Fotos do pavilhão de salas de aulas.

4.4 – Metodologia da medição

A metodologia completa, usada nas campanhas de medição, está descrita em [24]-[26]. Nessas campanhas, foram coletados a potência e alguns parâmetros de qualidade de serviço (QoS). O procedimento realizado consiste em:

1. **Determinação dos pontos de medição** - Para realizar as medições, primeiramente, foram determinados os pontos onde as mesmas seriam realizadas. No prédio anexo, foram marcados 21 pontos no andar superior e 25 no andar térreo. Os pontos de medição são mostrados na Figura 4.3(a), andar inferior. No pavilhão de salas de aulas, foram marcados 46 pontos de medição, mostrados na Figura 4.3(b), andar superior.
2. **Determinação da localização do transmissor** - O transmissor utilizado em ambas as medições foi um ponto de acesso (PA), transmitindo na frequência de 2,4 GHz (rede em estudo). Posicionado em uma das extremidades dos prédios, com o objetivo de se verificar a variação de potência e dos parâmetros de QoS com a distância entre transmissor e receptor (Tx-Rx), além do posicionamento de obstáculos (paredes) entre Tx-Rx. A Figura 4.3(a) e (b) apresenta as plantas baixas dos ambientes medidos.

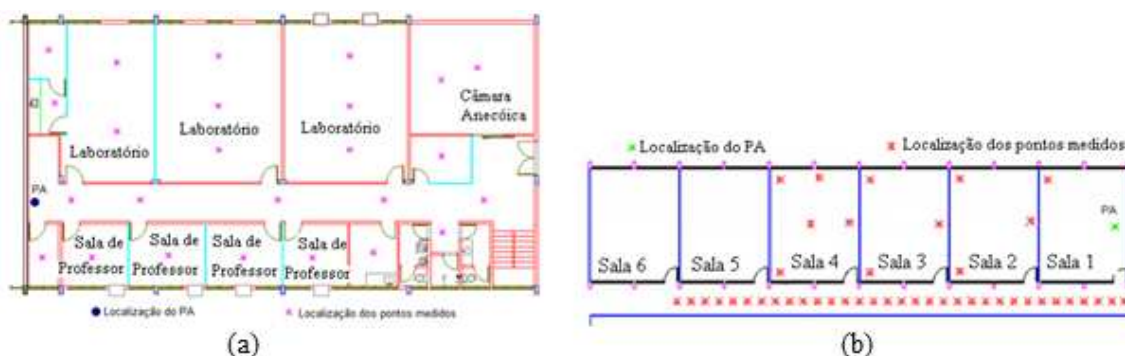


Figura 4.3 – Planta baixa do anexo (a) e do pavilhão de salas de aula (b). Com a localização dos pontos medidos e do ponto de acesso (PA), transmissor do sinal.

Não houve pontos de medição nas salas 5 e 6, Fig. 4.3(b), porque a potência do sinal transmitido que chegava a essas salas era tão baixa que o receptor não conseguia distingui-la do ruído. Além do mais, como forma de simplificação, neste trabalho não são consideradas as medições realizadas no andar superior do prédio anexo.

3. **Medição da potência recebida** - Um *notebook* foi utilizado para receber o sinal da WLAN, rede em estudo. Foi necessária a instalação de um *software*, chamado *Network Stumbler* [27], para medir, e armazenar em arquivo, a potência recebida. A Figura 4.4 mostra uma imagem do referido *software* em utilização. Em cada ponto medido, o *notebook* receptor era posicionado e ficava parado por cerca de 3 minutos, recebendo o sinal e, ao final da medição, tirava-se uma média da potência recebida para cada ponto medido.

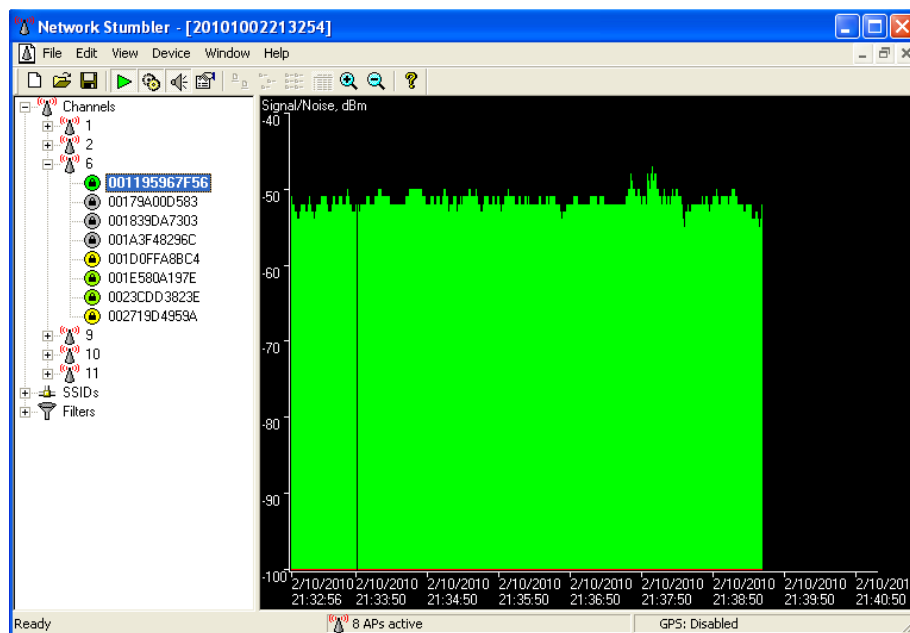


Figura 4.4 – Tela do *software Network Stumbler*.

Após as campanhas de medição, os dados obtidos foram tratados. A potência foi calculada através da média obtida em cada arquivo coletado, como foi descrito anteriormente, e a distância Tx-Rx foi obtida com o uso do *software* AUTOCAD [28]. Em cada ponto medido foi obtida a distância dos mesmos para duas paredes adjacentes, isso

para poder localizar exatamente o ponto medido na planta baixa do prédio e, assim, o programa conseguia estimar a distância entre o PA transmissor e cada ponto medido.

4. **Medição dos Parâmetros de QoS** - Em ambas as campanhas descritas neste trabalho, mediu-se simultaneamente a potência recebida e os parâmetros de QoS. A seguir é descrita a metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros de QoS.

Prédio Anexo

Após a determinação dos pontos de medição e do PA, foi originada uma nova rede, que foi chamada de Rede em Estudo, cuja potência transmitida pelo PA foi de 18 dBm. O PA utilizado foi um 802.11g *Linksys*® WRT54G Router Speed Booster;

1. **Conexão da Rede em Estudo** - A arquitetura da Rede em Estudo é mostrada na Figura 4.5. Essa rede utiliza o canal 7 (frequência central de 2,442 GHz). O PA é conectado a uma rede cabeada, através da sua entrada *Internet* e além dessa entrada esse modelo de PA tem 4 saídas. Sendo que uma dessas saídas é conectada, através de um cabo de rede, a uma das portas de um analisador de protocolos RADCOM® que, por sua vez, está conectado pela sua outra porta, a um computador. Esse computador foi usado como receptor de chamadas VoIP (R-VoIP) no qual foi utilizado o programa Openphone [29];

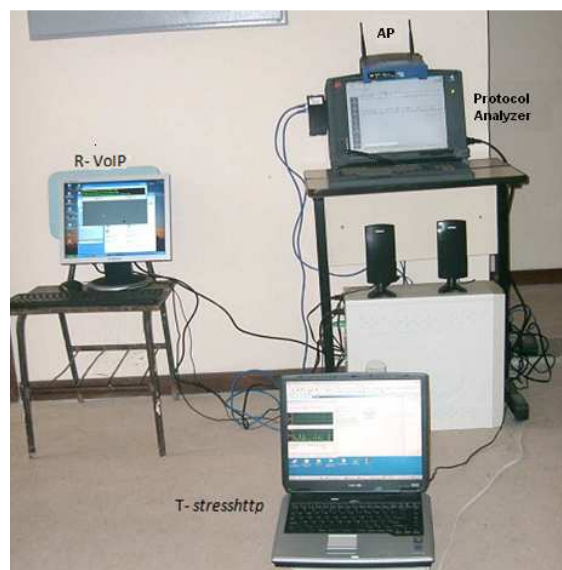


Figura 4.5 – Rede em estudo.

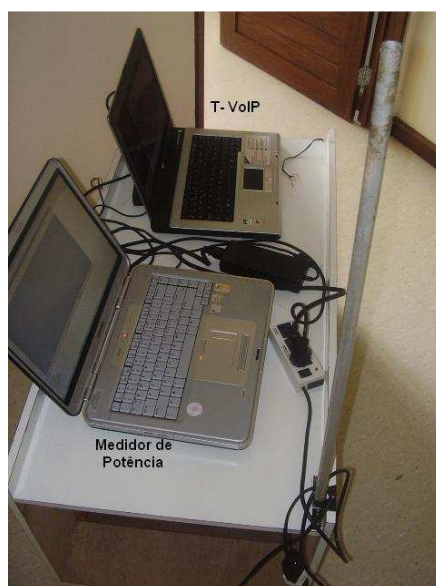


Figura 4.6 – Carrinho com os *notebooks*.

2. **Geração de tráfego na Rede em Estudo** - Além da aplicação de VoIP, outra aplicação foi usada para compartilhar a largura de banda disponível na rede de estudo. Isso foi necessário implementar depois da verificação de que quando a largura de banda total estava disponível somente para a transmissão VoIP, os parâmetros de QoS apresentavam pouca variação com a distância. Um *notebook*, mostrado na Fig. 4.5, gerava tráfego na rede WLAN. Para tanto, foi implementada uma aplicação em Delphi para transferir um arquivo de um *notebook* (*T-stresshttp*) associado à WLAN em estudo para um servidor (localizado em outro prédio) através da rede cabeada. Essa aplicação, chamada *stresshttp*, gerava 4 sessões de transferência *http* utilizando *threads* no intervalo de 10 microssegundos. O arquivo transferido tinha o tamanho de 149 kB;

3. **Transmissor VoIP** - Para transmitir as chamadas VoIP, realizadas através do CallGen323 [30] num total de 3 chamadas com duração de 1 minuto cada, foi usado um outro *notebook* (T-VoIP) localizado sobre um carrinho, conforme Fig. 4.6, que foi posicionado nos vários pontos de medição.

Pavilhão de Salas de Aula

1. **Conexão da Rede em Estudo** – A Fig. 4.7 apresenta a rede em estudo utilizada nesta campanha de medição. Nesta campanha de medição o PA foi configurado para o canal 1, frequência central de 2,412 GHz e estava conectado, através de um cabo de rede, a uma das portas de um analisador de protocolos RADCOM© [31] que, por sua vez, estava conectado pela sua outra porta, a um computador que foi utilizado como receptor de chamadas VoIP (R-VoIP) através do *software* livre Openphone [30];



Figura 4.7 – Rede montada para esta campanha de medição.

2. **Geração de Tráfego na Rede em Estudo** – Nessa campanha de medição, a aplicação utilizada para gerar tráfego na rede em estudo e compartilhar a largura de banda foi gerada pelo o programa Iperf [32], rodando no modo cliente, criando um fluxo UDP de largura de banda especificada (7Mbps). O Iperf permite especificar o tempo durante o qual o tráfego é gerado (nas medições o tempo especificado foi de aproximadamente 8 horas); o *notebook* denominado T-Iperf foi usado para transmitir a aplicação Iperf e o *notebook* R-Iperf para recebê-la;
3. **Transmissor VoIP** – O procedimento foi o mesmo utilizado na campanha anteriormente descrita. Um carrinho com dois *notebooks* percorria os pontos de medição, permanecendo 3 minutos em cada ponto. Sobre o carrinho ia um *notebook* (T-VoIP) cuja função era gerar as chamadas VoIP, realizadas através do CallGen323 [30], na Fig. 4.8 aparece uma foto com o transmissor VoIP.

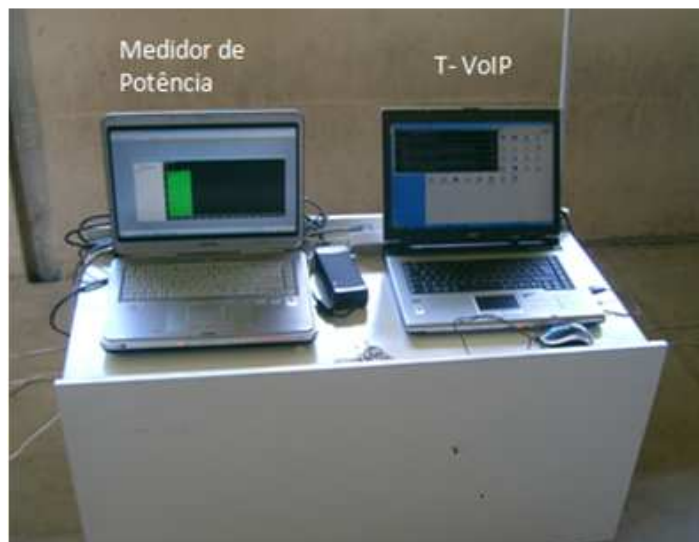


Figura 4.8 – Carrinho com o transmissor das chamadas VoIP e o medidor de potência.

Os resultados dos parâmetros de QoS são apresentados no Capítulo 5.

4.5 – Campanhas de medição para se obter o termo *E_{pol}*

Para se verificar o efeito da polarização das antenas transmissora e receptora, foram realizadas várias campanhas de medição no prédio anexo. Essas campanhas usaram a seguinte metodologia:

- Alinhamento entre as antenas, ficando o conjunto transmissor, o obstáculo e o conjunto receptor alinhados e as antenas com os lóbulos direcionados;
- Ajuste do Transmissor (gerador de varredura) gerando uma onda contínua, sem modulação, na frequência desejada;
- Ajuste do receptor (analisador de espectro) sintonizando a onda gerada. Um arquivo com o sinal recebido era armazenado. Em seguida, esses arquivos eram observados e comparados.

As frequências medidas foram: 2,4 GHz; 3,5 GHz; 5,85 GHz e 10 GHz. As antenas utilizadas eram todas cornetas, ou seja, altamente diretivas, com as características apresentadas na Tabela 4.1.


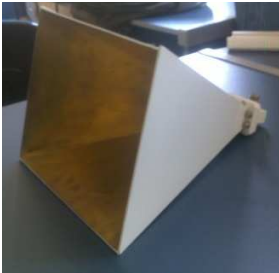
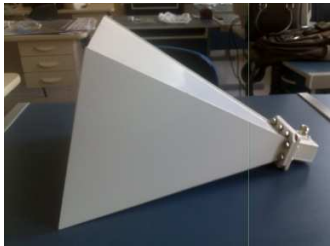

TABELA 4.1 – Características das antenas cornetas utilizadas.

Faixa de Frequência	Ganho*	Dimensões (largura- altura-comprimento)
2,4 – 2,48 GHz	15 dB	150-150-300 mm
3,3 – 5 GHz	18 dB	300-250-350 mm
5,8 – 8,2 GHz	20 dB	240-200-280 mm
10 GHz	15 dB	66,58-47,32-170 mm

*para a frequência utilizada na medição

A Tabela 4.2 apresenta algumas fotos das antenas utilizadas:

TABELA 4.2 – Fotos das antenas utilizadas

Frequência	Antena	Frequência	Antena
2,4 GHz		3,5 GHz	
5,85 GHz		10 GHz	

4.5.1 – Os conjuntos transmissor e receptor

O conjunto transmissor, que gerava o sinal, foi composto por um gerador de varredura (HP83752A) e uma antena, capaz de transmitir na frequência desejada. O sinal gerado era um onda contínua, sem modulação, com nível de potência de 10 dBm. As

antenas estavam alinhadas e com seus lóbulos direcionados para o obstáculo (parede, porta, etc.).

O conjunto receptor foi composto de um analisador de espectro (HP EXA N9010A) e uma antena com as mesmas características da utilizada no conjunto transmissor.

4.5.2 – Linha de visada entre Tx-Rx

Primeiramente, foram realizadas medições sem nenhum obstáculo entre transmissor e receptor. A Fig. 4.9 apresenta uma ilustração do esquema de medição. Um gerador de varredura foi usado como transmissor (Tx) para gerar uma onda contínua com potência de 10 dBm. Em seguida foram posicionados obstáculos entre o transmissor e o receptor (Rx) para se verificar a perda do sinal. O ambiente em volta de Tx-Rx foi mantido o mesmo, apesar das antenas serem altamente diretivas. Nessas medições foram, também, analisados os efeitos da polarização entre Tx-Rx desta forma, mediu-se, primeiramente, com ambas as antenas nas mesmas polarizações (vertical-vertical e horizontal-horizontal) e, posteriormente, foram medidas com as polarizações invertidas: vertical-horizontal e horizontal-vertical para o Tx e o Rx, respectivamente. Os obstáculos utilizados foram típicos de ambientes fechados (*indoor*): parede de tijolo, folha de compensado, parede de divisória e uma porta de madeira. A Tabela 4.3 mostra os valores da potência recebida (dBm) para uma potência transmitida de 10 dBm. Esses valores são para a situação de linha de visada, ou seja, sem obstáculos entre Tx-Rx e em várias frequências.

Inicialmente as medições foram realizadas verificando-se a reciprocidade entre o transmissor e o receptor, ou seja, a posição do transmissor era trocada com a posição do receptor para cada situação de polarização das antenas. Esse procedimento foi realizado também para se verificar o quanto o ambiente ao redor influenciava na medição. Considerando que os resultados eram bem próximos, essa prática foi desprezada nas outras medições.

A Tabela 4.3 apresenta a intensidade do sinal recebido em cada combinação de polarização Tx-Rx diferente (vertical-vertical, horizontal-horizontal, vertical-horizontal, horizontal-vertical), sempre lembrando que a intensidade do sinal transmitido foi 10 dBm. A distância entre Tx-Rx era de 1 m.

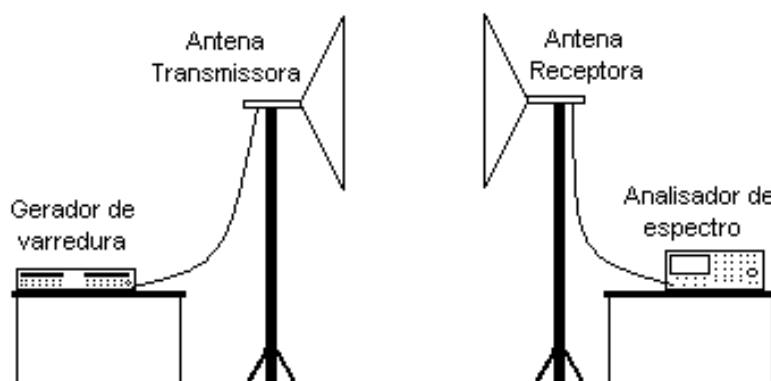


Figura 4.9 – Medição com linha de visada entre Tx-Rx na frequência de 10 GHz.

TABELA 4.3 – Intensidade recebida na situação de linha de visada entre Tx-Rx (dBm).

Freq. (GHz)	Tx(vert.) Rx(vert.)	Tx(hor.) Rx(hor.)	Tx(vert.) Rx(hor.)	Tx(hor.) Rx(vert.)
2,4	-9,69	-9,78	-33,33	-40,4
3,5	-4,97	-4,53	-40,24	-36,79
5,85	-8,7	-7,92	-40,68	-34,7
10	-20,7	-21,3	-60,68	-51,74

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 apresentam valores de potência recebida maior quando as antenas estão na mesma polarização e menor potência recebida, ou seja, maior perda quando as antenas tinham polarizações diferentes. Exatamente como era esperado. Porém, analisando-se mais atentamente os resultados, percebe-se algo não esperado, por exemplo: o valor da potência recebida na frequência de 2,4 GHz é menor do que os valores recebidos em 3,5 e 5,85 GHz. O que é uma incongruência, uma vez que a perda aumenta com o aumento da frequência. Esse resultado fez com que a medição fosse refeita várias vezes, porém, o comportamento se mostrou o mesmo. Para justificar o resultado, foram desligadas todas as redes sem fio do prédio, porém, o comportamento continuou. Uma possível justificativa reside nos ganhos das antenas. O ganho de uma antena varia com a frequência e o fabricante, em sua maioria, não fornece a curva do ganho com a frequência. O que é fornecido é o valor médio do ganho para cada faixa de

frequência. Observando novamente a Tabela 4.3, percebe-se que os valores de potência recebida quando as antenas estão na mesma polarização são bem mais próximos do que os valores de potência recebida quando as antenas estão com polarizações diferentes. Todas essas dúvidas poderão ser respondidas quando as medições forem realizadas dentro de uma câmara anecoica.

4.5.3 – Parede de tijolos entre Tx-Rx

A parede utilizada na medição, em destaque na Fig. 4.10, fica no andar térreo do anexo ao Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação (LEEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A parede tem espessura de 11 cm. As medições foram realizadas com o Tx do lado de fora da sala, ou seja, no corredor para evitar reflexões na parede do corredor que ficava atrás do Tx. A distância de 1 m entre Tx-Rx foi sempre mantida. A Tabela 4.4 apresenta as potências recebidas para cada frequência e para cada combinação de polarização medidas.

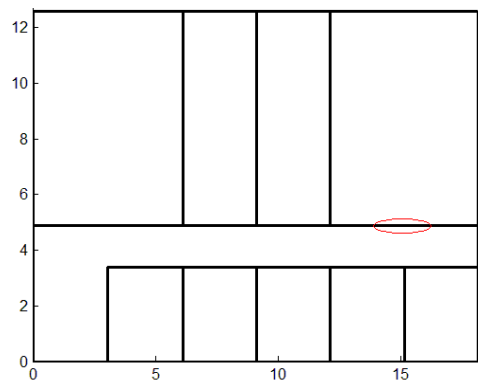


Figura 4.10 – A ilustração da planta baixa do térreo do anexo, colocando em destaque a localização da parede de tijolos utilizada na medição.

A Fig. 4.11 apresenta uma ilustração das antenas com a parede de tijolos entre elas.

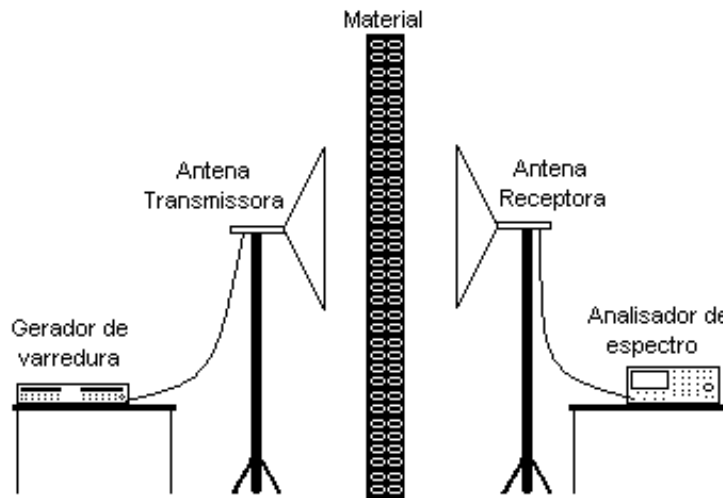


Figura 4.11 – Ilustração com a parede de tijolos entre a transmissora e a receptora.

TABELA 4.4 – Resultados das potências recebidas (dBm).

Freq. (GHz)	Tx(vert.) Rx(vert.)	Tx(hor.) Rx(hor.)	Tx(vert.) Rx(hor.)	Tx(hor.) Rx(vert.)
2,4	-19,28	-26,9	-38,94	-38,2
3,5	-19,65	-15,41	-38,89	-38,23
5,85	-17	-23,53	-41,3	-46,83
10	-39,54	-37,68	-55,1	-54,25

Observando-se a Tabela 4.4 percebe-se que ela não apresenta o mesmo comportamento do apresentado quando as antenas estavam em visada. Isso pode ser explicado pelo fato de que os tijolos apresentam uma estrutura interna com furos desta forma, de acordo com a polarização da onda e a sua posição de transmissão, a onda pode percorrer caminhos com obstáculos diferentes. A onda para atravessar uma parede de tijolos pode encontrar no seu percurso, por exemplo, cimento, tijolo e ar ou somente tijolo e cimento ou, ainda, simplesmente cimento. Isso explica o comportamento dos resultados obtidos.

4.5.4 – Parede de divisória entre Tx-Rx

A parede utilizada para essa medição fica situada entre as salas de dois professores no mesmo prédio. A Fig. 4.12 apresenta essa parede em destaque e a Fig. 4.13 apresenta uma foto da referida parede. A Tabela 4.5 apresenta os resultados da medição para cada combinação de polarização.

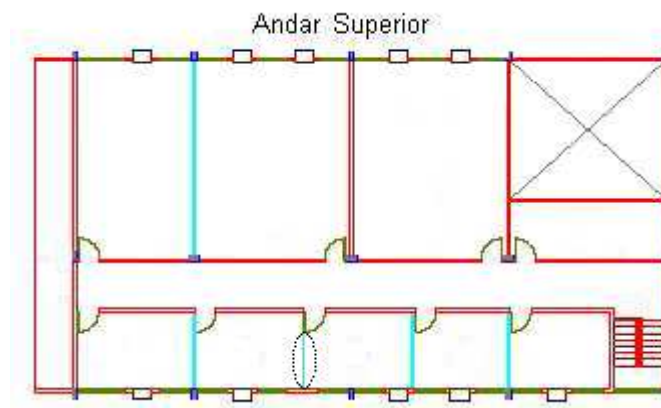


Figura 4.12– Localização (na planta baixa) da divisória utilizada na medição.

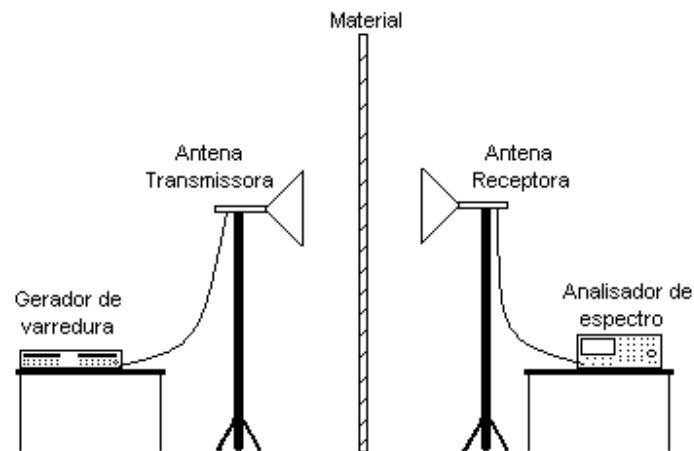


Figura 4.13 – Ilustração da parede de divisória entre as antenas.

TABELA 4.5 – Potência recebida, em dBm, para uma potência transmitida de 10 dBm.

Freq. (GHz)	Tx(vert.) Rx(vert.)	Tx(hor.) Rx(hor.)	Tx(vert.) Rx(hor.)	Tx(hor.) Rx(vert.)
2,4	-10,99	-11,34	-38,44	-27,42
3,5	-8,27	-7,95	-37,62	-38,27
5,85	-15,93	-11,26	-38,6	-31,67
10	-23,95	-24,66	-52,83	-47

Nessa medição novamente ocorreu o inesperado, quando as antenas estão na mesma polarização, a potência recebida é maior em 3,5 GHz do que em 2,4 GHz. Analisando mais cuidadosamente o resultado na situação horizontal-vertical percebe-se que os valores de potência recebida não estão totalmente coerentes. Essas incoerências podem ser explicadas pelo fato de as medições não terem sido realizadas em câmara anecoica, ou seja, há reflexões do sinal transmitido.

4.5.5 – Porta de Madeira entre Tx-Rx

Nessa medição foi usada uma porta de madeira para servir de obstáculo entre Tx-Rx, simulando, desta forma, a situação de um usuário dentro de uma sala fechada, quando o transmissor encontra-se do lado de fora desta referida sala. A Fig. 4.14 apresenta uma ilustração do *setup* de medição utilizado. Os resultados da medição são mostrados na Tabela 4.6.

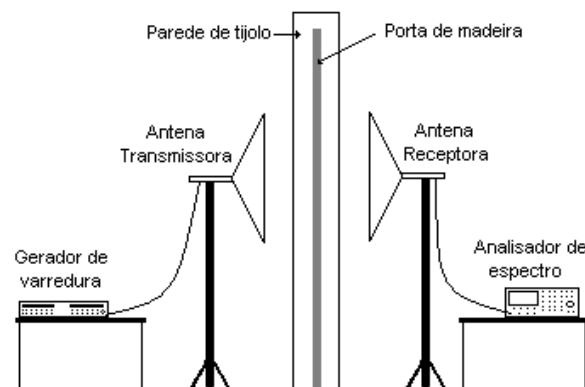


Figura 4.14 – Ilustração da porta de madeira entre as antenas.

TABELA 4.6 – Resultados da potência recebida (dBm), para cada conjunto de polarizações e para uma porta de madeira como obstáculo.

Freq. (GHz)	Tx(vert.) Rx(vert.)	Tx(hor.) Rx(hor.)	Tx(vert.) Rx(hor.)	Tx(hor.) Rx(vert.)
2,4	-12,33	-11,1	-34,55	-28,47
3,5	-9,36	-5,51	-34,74	-47,17
5,85	-13,88	-11,08	-43,52	-36,51
10	-29,91	-28,95	-59,71	-58,75

O comportamento da potência recebida com a porta de madeira como obstáculo entre transmissor e receptor, apresentou um comportamento semelhante ao apresentado nas outras medições, com obstáculos diferentes.

4.5.6 – Compensado entre Tx-Rx

Outro obstáculo utilizado foi uma “folha” de compensado de 1 cm de espessura. Com a distância Tx-Rx sendo de aproximadamente 1 m. A Fig. 4.17 apresenta uma ilustração do esquema utilizado na medição, enquanto a Tabela 4.7 apresenta os resultados de potência recebida obtidos.

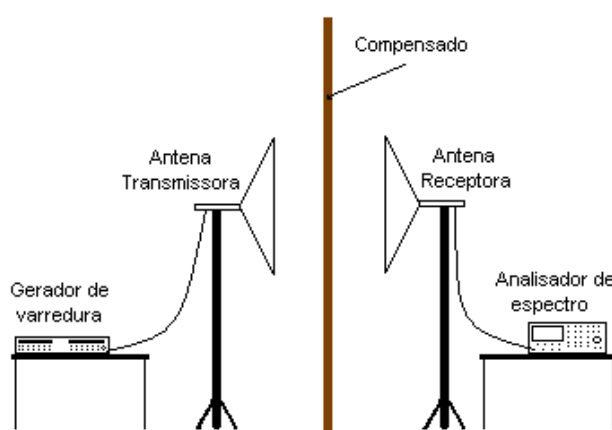


Figura 4.15 – Compensado entre Tx-Rx.

TABELA 4.7 – Resultados da potência recebida (dBm).

Freq. (GHz)	Tx(vert.) Rx(vert.)	Tx(hor.) Rx(hor.)	Tx(vert.) Rx(hor.)	Tx(hor.) Rx(vert.)
2,4	-11,81	-11,99	-29,56	-32,17
3,5	-6,52	-7,11	-40,23	-43,03
5,85	-9,8	-8,95	-42,13	-37,15
10	-22,8	-23,07	-63,7	-53,35

Novamente, o comportamento do resultado se manteve constante. Incluindo o comportamento inesperado.

A Fig. 4.16 apresenta 5 gráficos, um para cada material medido. Esses gráficos mostram o comportamento da perda de propagação para cada combinação de polarização:

- VV - Tx e Rx na polarização vertical;
- HH - Tx e Rx na polarização horizontal;
- VH - Tx na vertical e Rx na horizontal;
- HV-Tx na horizontal e Rx na vertical.

Observa-se na Fig.4.16 o comportamento dos resultados obtidos da medição. Em geral, na frequência de 2,4 GHz a potência recebida é menor que em 3,5 GHz, o que não representa o comportamento esperado. Desta forma, a perda obtida (diferença entre a potência transmitida e a potência recebida) é menor em 3,5 GHz do que em 2,4 GHz.

Os valores de M_2 e M_1 foram obtidos dos valores mostrados na Fig. 4.16.

A Tabela 4.8 apresenta a perda obtida para cada material e em cada frequência medida. Essa perda é obtida da seguinte forma:

$$PL = PL_{zero} - Erro - P_{pol} - P_{média} \quad (4.1)$$

Sendo PL_{zero} calculada pela fórmula da perda no espaço livre para a distância de referência (1 metro) para cada frequência medida. *Erro* é um valor que existe devido à medição não ter sido realizada em uma câmara anecoica. Explicando melhor:

quando não há nenhum obstáculo entre as antenas (linha de visada), não há perda devido a polarização, entretanto, não foi isso o observado. Pois, há diferença de potência recebida quando ambas as antenas estão na polarização vertical ou horizontal, o que não deveria ocorrer se o ambiente fosse livre de reflexões, ou seja, esse termo aparece para contar esse erro de medição. P_{pol} (perda de polarização) é considerada zero, pois, seria esse o valor esperado para o caso ideal, ou seja, não haveria (em visada) diferença de perda se ambas as antenas estivessem na vertical ou horizontal. $P_{média}$ é calculada da seguinte forma: obtém-se a média da perda medida quando as ambas as antenas estão com polarização vertical, repete-se o cálculo para quando ambas as antenas estão com a polarização horizontal. Finalmente, faz-se a subtração de uma média pela outra.

Seguindo os procedimentos acima descritos, é possível obter a Tabela 4.8.

TABELA 4.8 - Perda obtida para cada material/frequência medidos.

Frequências (GHz)	Perda nos Materiais em dB				
	Visada	Compensado	Madeira	Divisória	Tijolo
2,4	0	2,1643	1,9368	1,4267	11,8626
3,5	0	2,0606	2,2772	3,3626	12,2875
5,85	0	1,0617	3,9656	4,7029	10,8459
10	0	1,9433	8,4139	3,3009	17,5215

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.8 é possível observar que o obstáculo que apresenta maior perda para a passagem do sinal é a parede de tijolo.

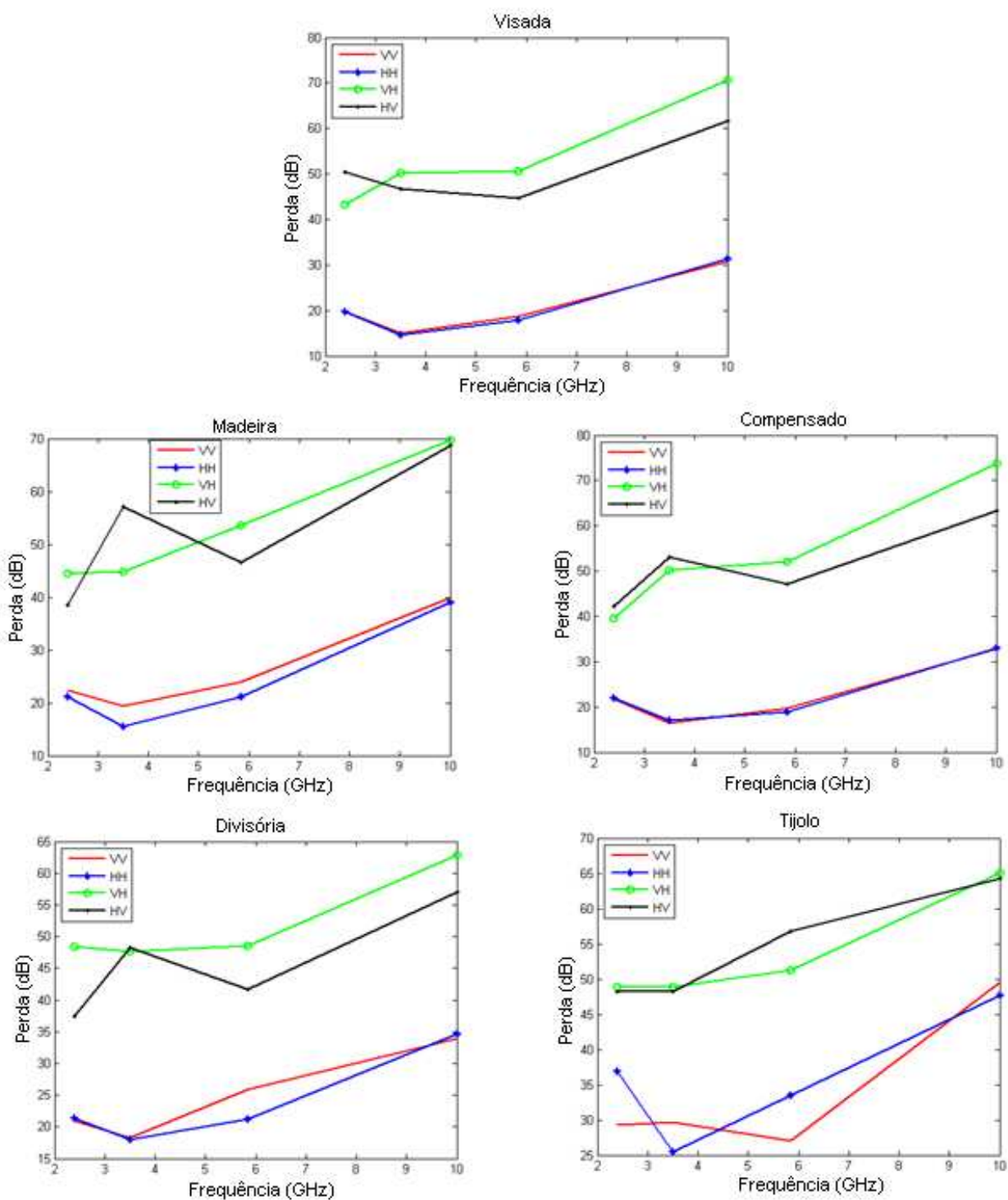


Figura 4.16 – Gráficos comparando as diferentes combinações de polarizações das antenas para cada material entre Tx-Rx.

4.6 – Considerações Finais

Comparando-se os resultados obtidos percebe-se que os apresentam comportamentos similares, mesmo para as situações inesperadas. Os resultados incoerentes ou inesperados deveriam ser repetidos em uma câmara anecoica, uma vez que assim seriam eliminados alguns efeitos indesejáveis, por exemplo, reflexões do sinal transmitido, interferência de possíveis sinais externos e outros. Entretanto, mesmo sem a câmara anecoica, várias medições foram refeitas e confirmaram os resultados inesperados. Além disso, alguns testes foram realizados para se verificar o efeito de possíveis reflexões nos resultados encontrados. Com essa finalidade, um retângulo de alumínio foi posicionado próximo ao obstáculo (porta de madeira, parede de tijolos, compensado, divisória). No entanto, não se percebeu nenhuma grande variação no valor de potência medida. Os resultados desses testes permitiram confirmar os resultados obtidos.

Considerando que o objetivo principal era avaliar a variação da perda de propagação em várias frequências e principalmente o efeito da polarização das antenas acredita-se que a metodologia apresentada permite tirar algumas conclusões desses efeitos.

No Capítulo 5 são apresentados resultados obtidos decorrentes da medição e são feitas comparações entre esses resultados e os valores preditos pelo modelo proposto neste trabalho e os mais utilizados na literatura.

Capítulo 5

Resultados

5.1 – Comentários Iniciais

Este Capítulo apresenta os resultados das medições realizadas. Tanto a potência recebida como os parâmetros de QoS. Mostrando a área de cobertura quando se considera, ou não, o efeito da polarização.

5.2 – Investigando a eficiência do Modelo Proposto

Nesta seção é investigada a eficiência do modelo proposto, que considera as polarizações das antenas. Para isso, o modelo foi aplicado nos dois prédios onde se tem dados medidos da potência recebida e dos parâmetros de QoS.

5.2.1 – Prédio Anexo

Inicialmente são apresentados os resultados obtidos para o prédio anexo, descrito no Capítulo 4. Nesse prédio foi localizado um ponto de acesso, transmissor, e um *notebook*, funcionando como receptor fez as medições da potência recebida nos vários pontos de medição, enquanto um analisador de protocolos media alguns parâmetros de QoS. A polarização da antena transmissora, monopolo de um ponto de acesso, é vertical. Não há informações sobre a polarização da antena receptora, uma vez que era a antena interna de um *notebook*, mas acredita-se que é a mesma da maioria dos *notebooks*, ou seja, vertical.

A metodologia utilizada já foi descrita no Capítulo 4. A quantidade de medidas não foi suficiente para poder comparar os dados medidos com os dados preditos pelos modelos. Devido a isto foi necessário aumentar o número de dados, o que foi feito através de um regressor generalizado do programa MATLAB.

A rotina *newgrnn*, que é uma rotina interna do Matlab, serve para expandir (interpolare) os dados medidos usando uma micro rede neural artificial (RNA) e permite o uso de um parâmetro tracionador [1].

Tal expansão permitiu as simulações apresentadas a seguir. A planta-baixa do prédio medido foi utilizada no programa para localização dos pontos medidos e paredes necessárias para a aplicação do modelo (Fig. 5.1).

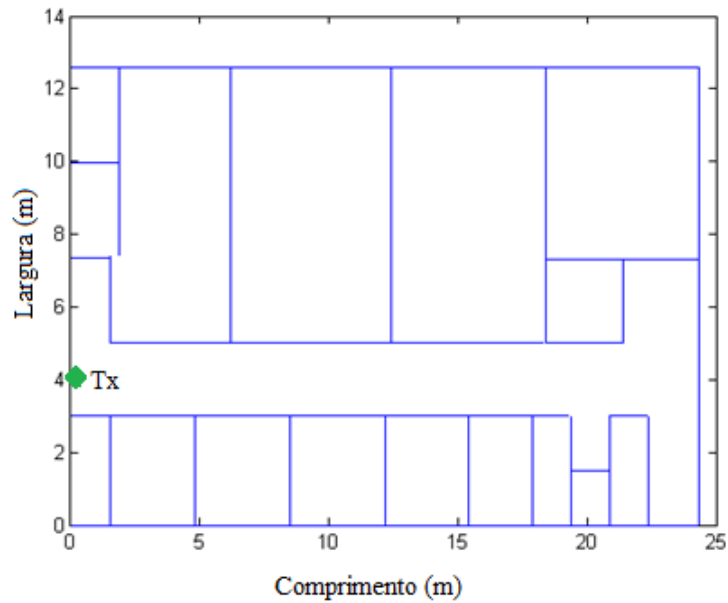


Figura 5.1 – Planta baixa do andar inferior do prédio anexo.

Após a inserção da planta baixa e da expansão dos dados medidos, foi possível obter a simulação dos dados medidos mostrada na Fig. 5.2.

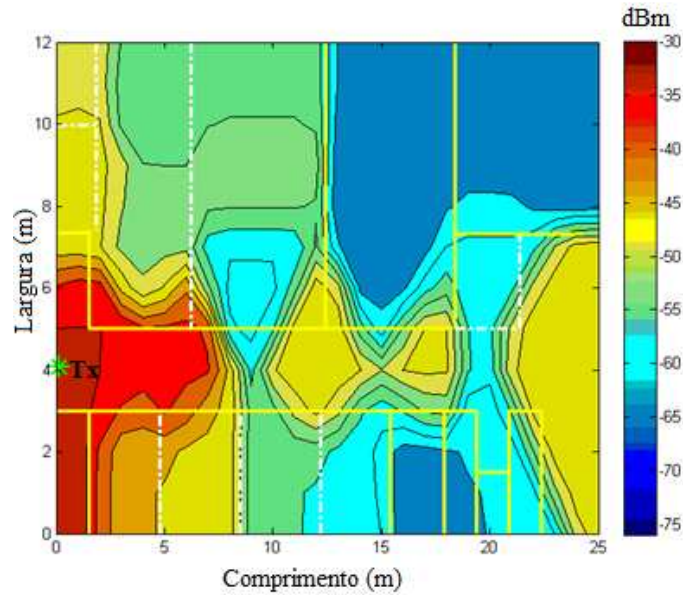


Figura 5.2 – Potência recebida medida e expandida com a escala de cores ao lado e a posição do transmissor indicada na figura.

A seguir são apresentadas as predições para os dois ambientes em estudo usando os modelos de Seidel-Rappaport [13], aproximação de Padé [14]-[15] e o modelo proposto nesta tese.

A escolha desses dois modelos foi devido ao fato do modelo Seidel-Rappaport ser bastante conhecido na literatura e o modelo que usa a aproximação de Padé ser diferente do modelo apresentado nesta tese somente pelo acréscimo do termo do efeito da polarização. Desta forma, comparando-se os dois modelos é possível analisar o acréscimo desse termo.

A Fig. 5.3 apresenta a predição realizada pelo modelo de Seidel-Rappaport, mostrado no Capítulo 2.

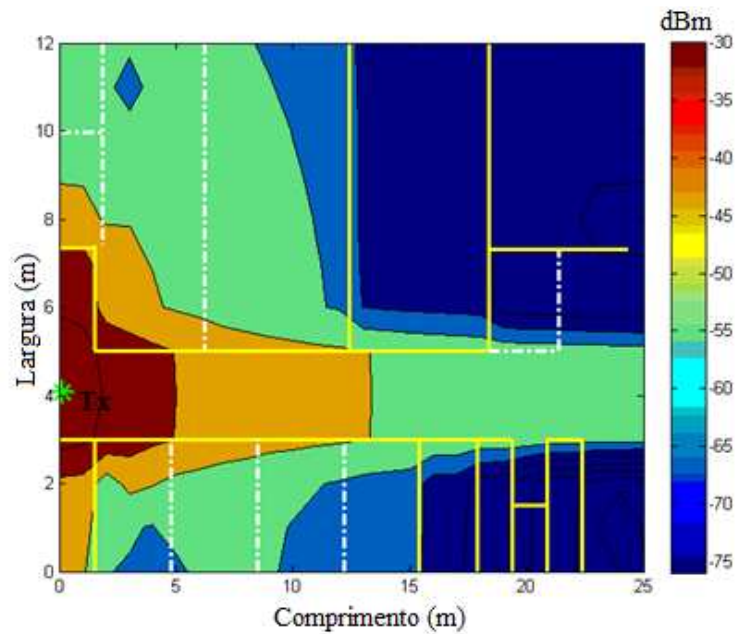


Figura 5.3 – Predição da potência recebida realizada pelo modelo de Seidel-Rappaport com a escala de cores ao lado e a localização do transmissor.

A Fig. 5.4 apresenta a predição da potência recebida feita pelo modelo de aproximação de Padé [1].

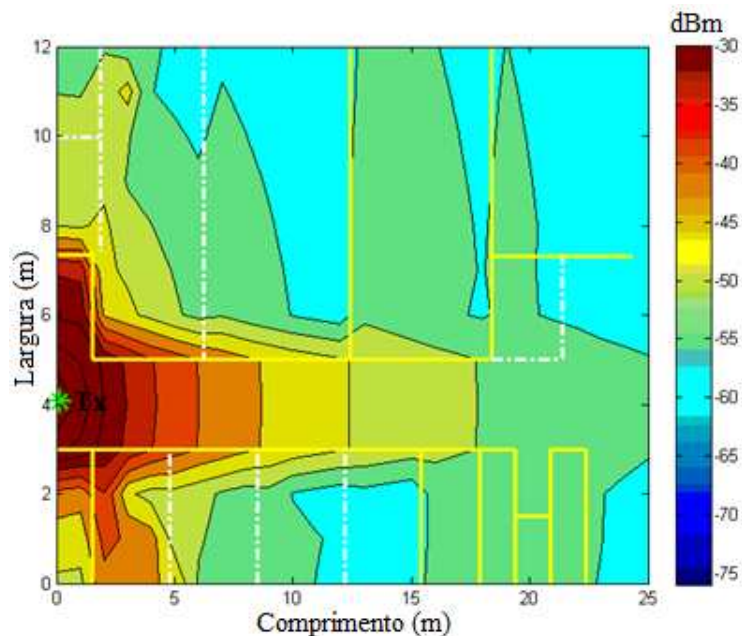


Figura 5.4 – Potência recebida predita pelo modelo apresentado em [1] com a escala de cores ao lado e a localização do transmissor.

Em nenhum momento, até aqui, foi utilizado o termo que considera a polarização das antenas transmissora e receptora.

A predição do modelo deste trabalho, com o termo que considera o efeito das polarizações das antenas, é mostrada na Fig. 5.5.

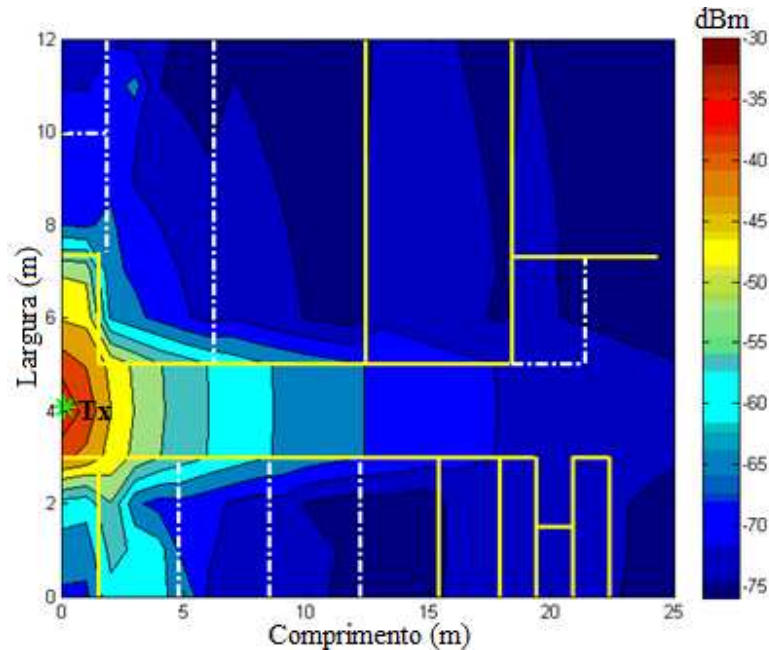


Figura 5.5 – Simulação da predição de potência recebida realizada pelo modelo com o termo proposto com a escala de cores ao lado e a localização do transmissor.

Comparando-se as Figs. 5.3, 5.4 e 5.5 é notável que o valor da potência recebida predita pelo modelo proposto neste trabalho é menor do que o predito pelos outros modelos testados. Ou seja, como era esperado, ao se acrescentar o termo do efeito de polarização a área de cobertura diminui.

5.2.2 – Pavilhão de Salas de Aula

Este prédio, como já mencionado, também pertence à Universidade Federal do Pará e foi descrito no Capítulo 4. Também foi realizada uma campanha de medição nas suas dependências por isso ele será utilizado a título de comparação dos modelos com os valores medidos. Para isso, os dados medidos também foram estendidos por um regressor

generalizado. Após a extensão dos dados medidos, foi possível chegar aos seguintes resultados:

A Figura 5.6 mostra a planta baixa do pavilhão de salas de aula inserida no programa de simulação.

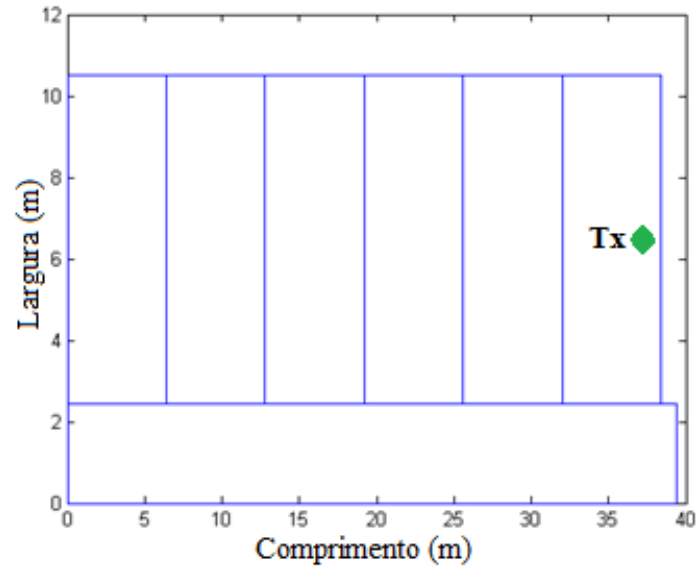


Figura 5.6 – Planta baixa do segundo andar do pavilhão de salas de aula onde foram realizadas medições, a localização do transmissor está destacada.

A Fig. 5.7 apresenta os dados expandidos inseridos na planta baixa mostrada na Fig. 5.6.

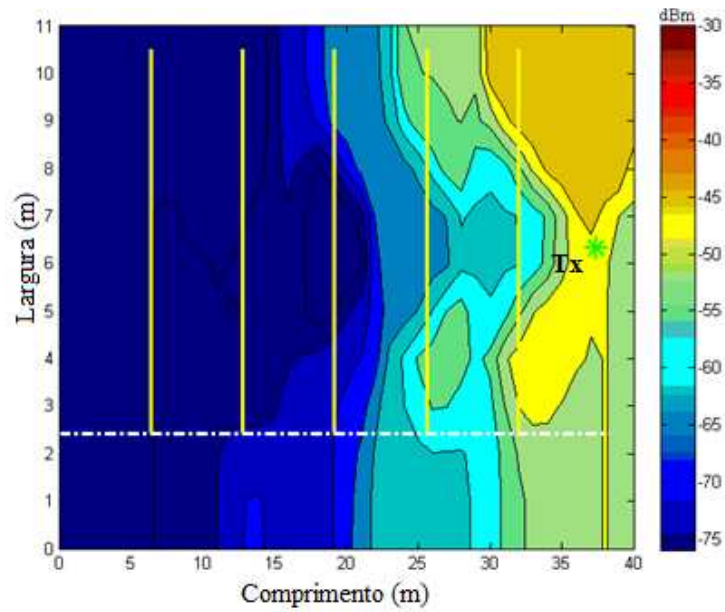


Figura 5.7 – Potência recebida, medida e expandida com a localização do transmissor.

A Figura 5.8 mostra os valores de potência recebida que foram preditos pelo modelo de Seidel-Rappaport.

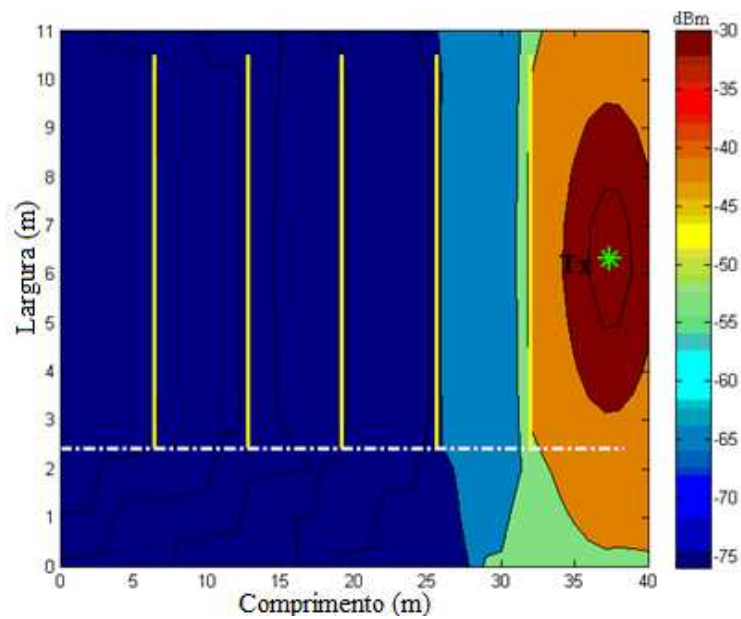


Figura 5.8 – Predição do modelo de Seidel-Rappaport com a localização do transmissor.

A Figura 5.9 mostra a predição feita pelo modelo apresentado em [1], que utiliza a aproximação de Padé.

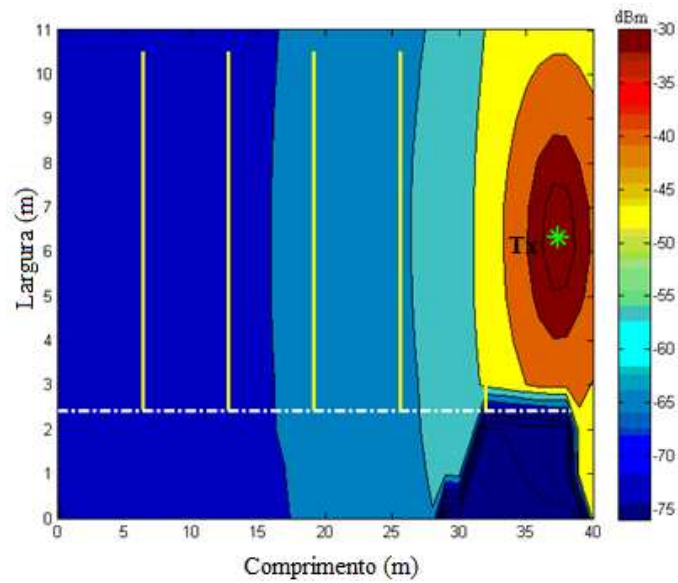


Figura 5.9 – Potência recebida predita pelo modelo descrito em [1] com a localização do transmissor.

Após a análise comparativa dos valores medidos e preditos pelos modelos disponíveis na literatura, partiu-se para a verificação da potência recebida predita pelo modelo proposto neste trabalho, que considera o efeito das polarizações das antenas. O resultado dessa predição é mostrado na Figura 5.10.

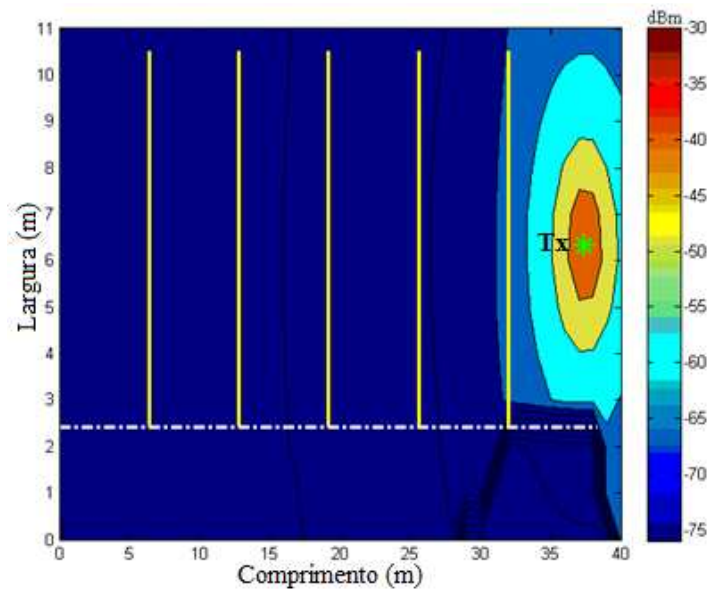


Figura 5.10 – Predição realizada pelo modelo proposto neste trabalho com a localização do transmissor.

A contribuição do modelo proposto foi acrescentar um efeito esperado, o de polarização das antenas, no cálculo da perda de propagação, quantificando esse efeito. Pode-se obter a área de cobertura de um transmissor interno (ponto de acesso, antenas *indoor*, etc), para qualquer posição do receptor.

Observa-se que em ambos os ambientes de medição a área de cobertura diminuiu. Comparando-se a predição realizada pelo modelo proposto e os modelos de Seidel-Rappaport e [1]. Isso acontece pelo fato do modelo proposto neste trabalho considerar o efeito de polarização das antenas transmissora e receptora. A consideração deste efeito diminui a potência recebida e consequentemente a área de cobertura de qualquer transmissor/receptor sem fio.

5.3 – Qualificador de Rede (QR)

Para cada serviço oferecido, a rede utiliza valores limiares distintos de parâmetros de QoS. Nas campanhas de medição descritas neste trabalho foi utilizado o serviço de voz sobre IP (VoIP), que é um serviço rigoroso em termos dos parâmetros de QoS. A Tabela 5.1 apresenta os valores limites que uma rede deve ter para se conseguir uma transmissão VoIP com boa qualidade.

TABELA 5.1 – Valores dos parâmetros de QoS requeridos para VoIP.

Parâmetros de QoS	Limiar
Potência recebida	acima de -76 dBm
<i>Jitter</i>	abaixo de 30 ms
Perda de pacotes	abaixo de 2%
PMOS	acima de 3

Esses valores de limiar para os padrões de QoS são definidos, para cada serviço através de recomendações como seguem, por exemplo: *jitter* - ITU-T Y1540, perda de pacotes - ITU-T Y.1541 e em [16]. Com base nesses valores de referência, foram adotados os seguintes valores limiares: atraso de pacotes menor ou igual a 250 ms; *jitter* menor ou

igual a 30 ms; perda de pacotes menor ou igual a 2%; e PMOS maior ou igual 3. Através desses valores limiares definiu-se um qualificador de rede QR , a partir da seguinte relação:

$$QR = \frac{\sum A}{T} \times 100\% \quad (5.1)$$

Sendo A o número de amostras que obedecem ao valor limiar padronizado pelo ITU-T e T o número total de amostras coletadas [24].

5.4 – Resultados de QR

5.4.1 – Prédio Anexo

A Tabela 5.2 apresenta os resultados do qualificador de rede (QR) para o prédio anexo. Nessa Tabela são mostrados dois resultados: para o modelo apresentado em [1] e para o modelo proposto neste trabalho, que considera o efeito da polarização.

TABELA 5.2 – Valores de QR para alguns parâmetros de QoS.

Modelo	<i>Jitter</i>	Perda de Pacotes	PMOS	Potência Recebida
Sem o efeito da polarização	100%	71,29%	99,34%	100%
Com o efeito da polarização	100%	57,76%	74,26%	100%

Da Tabela 5.2 pode-se concluir que no prédio anexo, 100% das amostras coletadas, em diferentes áreas do prédio, apresentam *jitter* e potência recebida dentro da regulamentação, ou seja, menor que 30 ms e maior que -76 dBm, respectivamente. Considerando, ou não, a polarização das antenas.

Entretanto, a perda de pacotes e o PMOS são fortemente influenciados pela consideração, ou não, do efeito da polarização. Possuindo uma diferença de mais de 10% no QR, ou seja, mais valores de amostras ficam fora do limite da regulamentação ao se considerar o efeito da polarização.

A Figura 5.11 mostra, graficamente, a diferença do QR quando se compara os valores de QoS preditos pelo modelo que não considera o efeito da polarização[1] com o modelo proposto neste trabalho e que considera tal efeito.

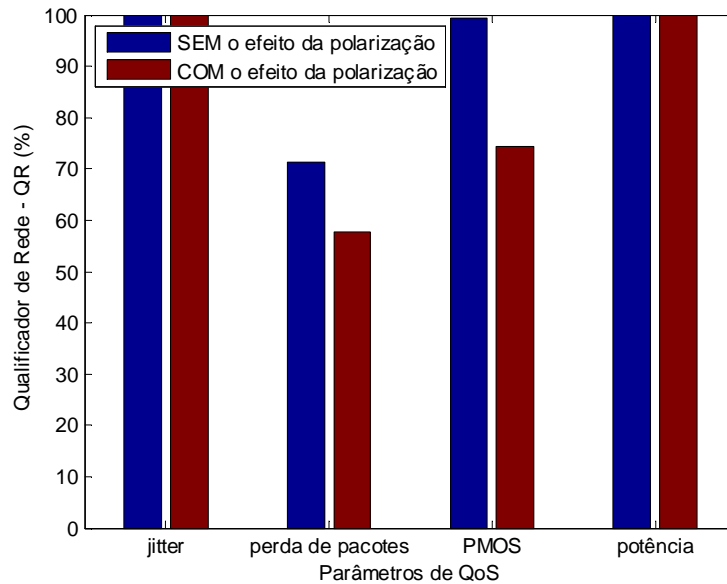


Figura 5.11 – Valores de QR para alguns parâmetros de QoS. Considerando, ou não, o efeito da polarização.

5.4.2 – Pavilhão de Salas de Aula

A Tabela 5.3 apresenta os valores de QR para modelos que consideram, ou não, o efeito da polarização. Esses resultados são para o prédio do pavilhão de salas de aula.

TABELA 5.3 - Valores de QR para alguns parâmetros de QoS.

Modelo	<i>Jitter</i>	Perda de Pacotes	PMOS	Potência Recebida
Sem o efeito da polarização	100%	82,93%	98,58%	94,72%
Com o efeito da polarização	100%	43,9%	80,49%	94,72%

Neste prédio o comportamento foi parecido com o prédio anterior. O *jitter* e a potência recebida não foram influenciados pela consideração, ou não, do efeito da polarização, apresentando os mesmos valores para os dois tipos de modelo. Entretanto, mais uma vez, a perda de pacotes e o PMOS foram bastante influenciados pela consideração, ou não, do efeito da polarização das antenas transmissora e receptora.

Comparando ambos os prédios, pode-se observar que para o prédio anexo o parâmetro de QoS mais afetado pelo efeito da polarização foi o PMOS, enquanto que no prédio do pavilhão de salas de aula, o parâmetro mais afetado foi a perda de pacotes.

A Figura 5.12 apresenta a diferença do QR para ambas as situações, ou seja, considerando ou não o efeito da polarização.

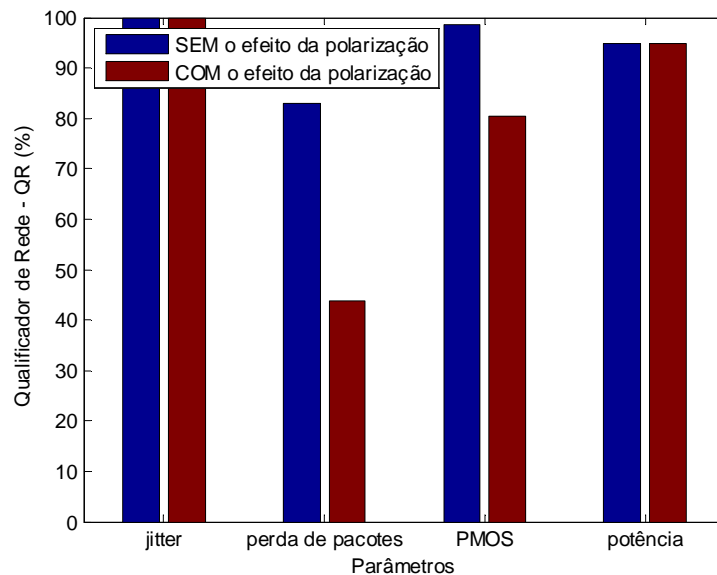


Figura 5.12 - Valores de QR para alguns parâmetros de QoS. Considerando, ou não, o efeito da polarização. Para o pavilhão de salas de aula.

5.5 – Raio de Cobertura

Outra característica da consideração do efeito da polarização, que é analisada neste trabalho, é o raio de cobertura do transmissor no prédio. Ou seja, a que distância do ponto de acesso (PA) ainda tem-se um bom valor do qualificador de rede, para todos os parâmetros de QoS considerados.

Para se determinar o raio de cobertura do PA foi estipulado um limite inferior de 70% para QR, ou seja, cada parâmetro medido deve ter 70% dos valores coletados satisfazendo a padronização ITU-T. Esse limite de 70% (aqui considerado) é uma consideração do projetista. A Fig. 5.13 ilustra, para o parâmetro perda de pacotes no andar térreo do prédio anexo, que na presença do efeito da polarização, o raio de cobertura é de aproximadamente 19 m. Sem a presença do efeito da polarização, esse raio é superior a 23 m.

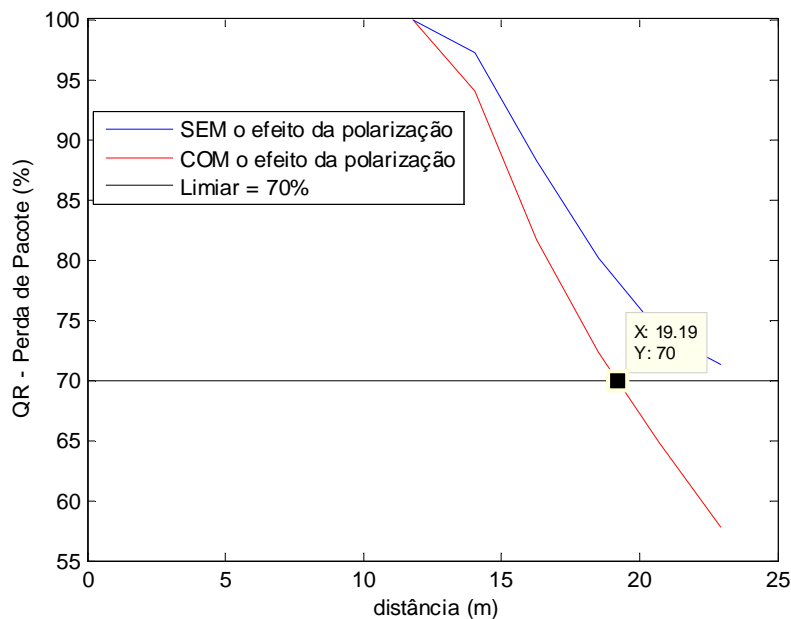


Figura 5.13 – Raio de cobertura do PA (somente para o andar térreo) considerando, ou não, o efeito da polarização. A abscissa representa a distância até o PA.

A Fig. 5.14 ilustra que, para o parâmetro perda de pacotes no andar superior do pavilhão de salas de aula, o raio de cobertura é de aproximadamente 23 m considerando o efeito da polarização. Sem considerar o efeito da polarização, esse raio é superior a 37 m.

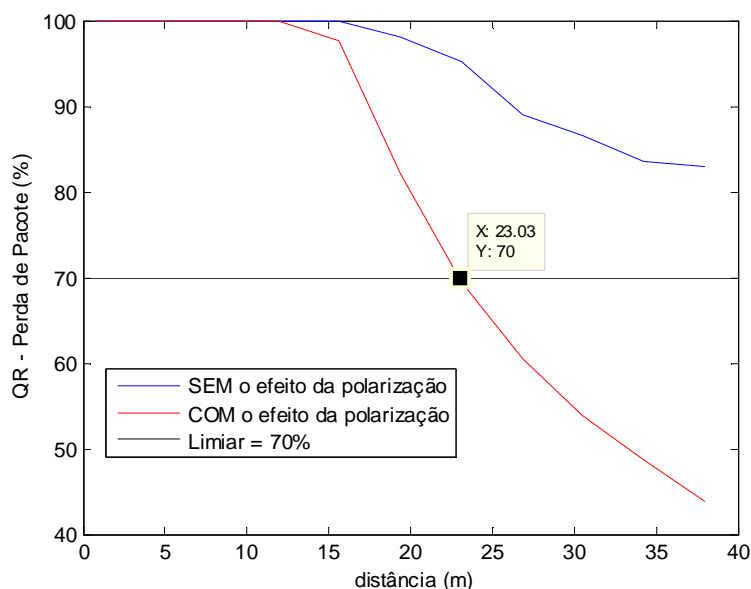


Figura 5.14 – Raio de cobertura do PA (somente para o andar superior) considerando, ou não, o efeito da polarização. A abscissa representa a distância até o PA.

5.6 – Área de Cobertura

Outra análise que foi feita inclui o cálculo da área de cobertura do prédio em questão. Entenda-se por área de cobertura, a área do prédio que possui o parâmetro desejado dentro do intervalo considerado.

5.6.1 – Prédio Anexo

A Tabela 5.4 apresenta a porcentagem de área do prédio que está dentro do intervalo especificado.

TABELA 5.4 – Porcentagem da área de cobertura que atende cada parâmetro de QoS.

Modelo	Jitter	Perda de Pacotes	PMOS	Potência Recebida
Sem o efeito da polarização	100%	68,05%	94,08%	100%
Com o efeito da polarização	100%	51,78%	66,86%	98,22%

Observe a diferença na porcentagem da área de cobertura do prédio que atende cada parâmetro de QoS e potência recebida, quando se considera, ou não, o efeito da polarização. Na Tabela 5.4 observa-se:

- *Jitter* – O limite considerado para este parâmetro foi menor que 30 ms. Sem e com o efeito da polarização a área do prédio que atende esse limiar é de 100%, o que indica que a consideração do efeito de polarização não alterou a área coberta para este parâmetro.
- Perda de Pacotes – O limiar considerado para esse parâmetro foi menor que 2%. Desta forma, sem considerar o efeito da polarização, 68,05% da área do prédio estava satisfazendo esse limite. Considerando esse efeito, a área de cobertura cai para 51,78%;
- PMOS – O limiar considerado foi maior que 3. Sem considerar o efeito da polarização, a área do prédio que satisfaz esse limiar é de 94,08% da área total do prédio (andar inferior). Considerando o efeito da polarização, essa área cai para 66,86% da área total;
- Potência Recebida – Para a potência recebida, o limiar estabelecido foi maior que -76 dBm. Sem considerar o efeito da polarização, a área do prédio que satisfaz este limiar foi 100%. Porém, considerando o efeito da polarização a área coberta caiu para 98,22%.

5.6.2 – Pavilhão de Salas de Aulas

A análise para o pavilhão de salas de aulas é a mesma feita para o prédio anexo. Somente as porcentagens de área que satisfazem os limiares é que mudam. Porém, os valores de limiares continuam os mesmos. A Tabela 5.5 mostra as porcentagens da área total do prédio (andar superior) que satisfazem os limiares definidos.

TABELA 5.5 – Porcentagem da área de cobertura que atende cada parâmetro de QoS.

Modelo	<i>Jitter</i>	Perda de Pacotes	PMOS	Potência Recebida
Sem o efeito da polarização	100%	82,93%	98,58%	94,72%
Com o efeito da polarização	100%	43,90%	80,49%	30,89%

5.7 – Considerações Finais

Observando os resultados apresentados neste capítulo fica evidente que quando se considera o efeito das polarizações das antenas os resultados se mostram menos otimistas, ou seja, potência recebida diminui o que faz com que o raio de cobertura do transmissor/receptor e, conseqüentemente, a área de cobertura do prédio diminua.

CONCLUSÕES

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer uma metodologia para o planejamento de redes de comunicação sem fio para ambientes *indoor*, considerando os parâmetros de qualidade de serviços e os efeitos da polarização das antenas. Foi proposto um modelo empírico para determinar a área de cobertura desse ambiente a partir de uma abordagem baseada em medições.

As campanhas de medição foram realizadas no prédio do Laboratório de Engenharia Elétrica e de Computação e no prédio de aulas do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará. As frequências utilizadas foram: 2,4 GHz para redes locais sem fio WLAN's; 3,5 GHz para WiMAX licenciado; 5,85 GHz para WiMAX livre e 10 GHz. A motivação das medições se valeram do fato de que somente um bom nível de potência não seria suficiente para garantir um bom desempenho da conexão do seu equipamento (telefone celular, Ipod, *notebook*, etc.), mas também, de outros parâmetros que servem para medir a qualidade da conexão. É através dos valores desses parâmetros que se mediu a chamada qualidade de serviço (QoS) da rede, que nada mais é do que uma indicação do desempenho da rede. Por conseguinte, para estimar a área de cobertura de um transmissor em ambiente fechado é necessário ter, além de um bom nível de potência recebida, para garantir a conexão com a rede, também, bom nível de QoS para garantir o desempenho da conexão.

Para avaliar o desempenho da rede foi definido um qualificador de rede que permitiu estabelecer, que parâmetros de qualidade de serviço foram afetados quando se incorporou no modelo proposto os efeitos da polarização das antenas. Dos resultados apresentados no capítulo 5 pode-se concluir que no prédio anexo (laboratórios), 100% das amostras coletadas, em diferentes áreas do prédio, apresentam *jitter* e potência recebida dentro da regulamentação, ou seja, menor que 30 ms e maior que -76 dBm, respectivamente, considerando ou não a polarização das antenas. Entretanto, a perda de pacotes e o PMOS foram fortemente influenciados pela consideração, ou não, do efeito da polarização.

No prédio do pavilhão de aulas o comportamento foi parecido com o prédio de laboratórios. O *jitter* e a potência recebida não foram influenciados pela consideração, ou não, do efeito da polarização, apresentando os mesmos valores para os dois tipos de

modelo. Entretanto, mais uma vez, a perda de pacotes e o PMOS foram bastante influenciados pela consideração, ou não, do efeito da polarização das antenas transmissora e receptora. Comparando ambos os prédios, pode-se observar que para o prédio anexo o parâmetro de QoS mais afetado pelo efeito da polarização foi o PMOS, enquanto que no prédio do pavilhão de salas de aula, o parâmetro mais afetado foi a perda de pacotes.

Para se chegar ao termo que trata do efeito das polarizações das antenas transmissora e receptora, que é o diferencial do modelo aqui apresentado, foram realizadas outras campanhas de medição que estão descritas no capítulo 4. A observação da posição do usuário ou equipamento de recepção, onde a polarização é desconhecida, permitiu incorporar esse termo no modelo proposto e avaliar a influência considerável do mesmo na avaliação do desempenho da rede e na definição da área de cobertura do enlace. Observou-se que em ambos os ambientes de medição a potência diminuiu com a distância quando se considerou o efeito da polarização. Isso acontece pelo fato do modelo proposto neste trabalho considerar o efeito de polarização das antenas transmissora e receptora. A consideração deste efeito diminui a potência recebida, e como consequência a área de cobertura de qualquer transmissor/receptor sem fio no interior de um prédio diminui, quando tal efeito é considerado.

Além da predição de potência (através do modelo proposto), foi realizado um estudo de previsão dos parâmetros de QoS. Os valores limites desses parâmetros dependem do serviço que está sendo utilizado e estão disponíveis nas recomendações do ITU-T.

A metodologia proposta para se obter os parâmetros de QoS desejados foram descritos neste trabalho. Um modelo empírico, obtido a partir dos resultados das campanhas de medição realizadas, permitiu prever os valores desses parâmetros. Dessa forma, foi possível descobrir que áreas, no interior do prédio, possuem cobertura de potência e de parâmetros de QoS necessários ao acesso serviço desejado. O nível de potência está relacionado com a possibilidade de conexão a rede. Os parâmetros de QoS, como o próprio nome sugere, estão ligados à qualidade da conexão.

Em resumo: o que o usuário deseja é ter potência suficiente para a conexão e que a mesma seja de boa qualidade.

Desta forma, este trabalho apresenta uma metodologia para se determinar as áreas, no interior do prédio, onde se poderá satisfazer o usuário nos quesitos desejados.

Para atingir os objetivos proposto nesta tese destaca-se algumas procedimentos considerados como as principais contribuições deste trabalho: foram estabelecidos procedimentos de medição para obtenção do nível de potência recebida numa área fechada; foi proposto um modelo empírico, baseado em medições realizadas, de perda de propagação, incluindo o efeito da polarização; utilizando o procedimento descrito, juntamente com o modelo apresentado, foi possível obter a área em que o usuário vai conseguir potência suficiente para se conectar a rede; foram definidos e medidos, com o procedimento de medição descrito, alguns parâmetros de qualidade de serviço necessários para se ter uma conexão com bom desempenho da rede; foi avaliado o efeito da polarização com a presença de materiais entre o transmissor e o receptor e para alguns materiais (utilizados na construção de prédios, por exemplo) foi destacado o quanto eles afetam a perda de um sinal ao atravessá-los, dependendo das polarizações das antenas; e finalmente foi feita a análise do desempenho da rede de teste – Baseada nos resultados obtidos, em relação à potência recebida e os parâmetros de QoS, e mostrar a possibilidade de se obter a área de cobertura dentro de um ambiente fechado.

Recomendações

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Tornar a metodologia mais acessível através da implementação de um programa computacional em que ao usuário seja possível inserir a planta-baixa do prédio e mais algumas informações imprescindíveis (frequência, número de pisos e paredes entre transmissor e receptor, entre outros). E com isso estabelecer os principais parâmetros para o planejamento de uma rede de comunicações sem fio para ambientes *indoor*;
- Avaliar o efeito da despolarização na presença de materiais usados nos ambientes *indoor* através de medições do fator de acoplamento de polarização (FAP) com variação do ângulo de incidência;
- Realizar medições dos efeitos da polarização em câmara anecoica para eliminar os efeitos do ambiente interferente;
- Avaliar os parâmetros de QoS e QoE para outras mídias.

REFERÊNCIAS

- [1] Fraiha, S. G. C. “Localização Ótima de Pontos de Acesso em Ambientes *indoor* em Sistemas Wireless”, Tese de doutorado da Universidade Federal do Pará, Maio de 2009
- [2] Neskovic, A.; Neskovic, N.; Paunovic, G. “Modern Approaches In Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment”, *IEEE Communications Surveys*, pp. 9-11, 2000
- [3] Ramirez, L. A. R. “Aplicação do Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo na Análise de Cobertura em Ambientes Interiores”, *Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, Agosto de 2008
- [4] Sarkar, T. K.; Kim, K.; Medouri, A.; Palma, M. S. “A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.45, no.3, June 2003
- [5] Zhang, J. T., Huang, Y., “Indoor Channel Characterization Comparisons for the Same Building with Different Dielectric Parameters”, *IEEE International Conference on Communication Systems, ICC. 2002*, vol. 2 , pp. 916-920, April 2002.
- [6] Zhang, J. T., Huang, Y., “Investigation of Building Dielectric Properties and the Effects on Indoor Radio Channel”, *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003)*, (Conf. Publ. n^o 491), vol. 1, pp. 207-210, April 2003
- [7] Saunders, S. R. “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”, *chapter 13, Ed. John Wiley & Sons Ltd, December 1999.*
- [8] Keenan, J. M., Motley, A. J., “Radio Coverage in Buildings”, *British Telecom Technology Journal*, vol. 8, n^o1, pp. 19-24, 1990
- [9] Lähteenmäki, J. “Propagation Prediction Models”, *chapter 4, section 4.7, “Indoor Propagation Models”, pp. 175–189, 1999*
- [10] Zvanovec, S., Pechac, P., Klepal, M., “Wireless LAN Networks Design: Site

- Survey or Propagation Modeling?”, *Radioengineering*, vol.12, no4, pp. 42-49, December 2003
- [11] Karlsson, P.; Bergljung, C.; Thomsen, E.; Börjeson, H. “Wideband Measurements and Analysis of Penetration Loss in the 5 GHz Band”, in *Proc. IEEE VTC Fall, Amsterdam-Netherlands*, pp. 2323-2328, September 1999
- [12] Lott, M.; Forkel, I. “A Multi-Wall-and-Floor Model for Indoor Radio Propagation”, *Vehicular Technology Conference (VTC 2001), Spring. IEEE VTS 53rd, vol.1*, pp. 464 – 468, May 2001
- [13] Rappaport, T. S. “Wireless Communications Principles and Practice”, Ed. Prentice Hall, EUA, 2002
- [14] Brezinski, C. “Padé – Type Approximation and General Orthogonal Polynomials”, *Birkhauser Verlag Basel*, 1980
- [15] Baker Jr., G. A.; Graves-Morris; P. “Padé Aproximants”, *New York: Cambridge University Press*, 1996
- [16] Cotanis, I., “Speaker Bias in Speech Quality Evaluation over End-to End Communication Links”, *Wireless Communications and Networking*, v. II, pp 1107-1111, 2003.
- [17] Medepalli, K.; Gopalakrishnan, P.; Famolari, D.; Kodama, T. “Voice capacity of IEEE 802.11b, 802.11a and 802.11g wireless LANs”, *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE vol.3*, pp. 1549 – 1553, December 2004.
- [18] <http://www.rede100fio.wordpress.com/2010/01/02/medindo-a-taxa-de-transferencia-throughput>, acessado em 26/03/2011.
- [19] Radharkrishnan, K.; Larijani, H. “Evaluation Perceived Voice Quality on Packet Networks using Different Random Neural Network Architectures” artigo publicado em “Performance Evaluation: An International Journal”, Ed. Elsevier, January, 2011.
- [20] Shadiku, M. N. O. “Elementos do Eletromagnetismo” 3ª. Edição, Ed. Bookman, Porto Alegre, 2004.
- [21] Silva, J. C.; Neto, A. G.; Carvalho, J. N.; Alencar, M. S. “Determining the Average Penetration Loss: Measurement Procedure and Results”, *Microwave and*

- Optoelectronics Conference, SBMO/IEEE MTT-S, APS and LEOS - IMOC '99. International*, 1999.
- [22] I. Cuiñas, J. P. Pugliese, A. Hammoudeh, M. G. Sánchez, “Frequency Dependence of Dielectric Constant of Construction Materials in Microwave and Millimeter-Wave Bands”, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 30, n^o 2, pp 123 – 124, July 2001.
- [23] Cavalcante, G. P. S. “A Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Florestas”, Tese apresentada em concurso para professor titular da Universidade Federal do Pará, 1986.
- [26] Fraiha, S. G. C.; Rodrigues, J. C.; Araújo, J. P.; Gomes, H. S.; Francês, C. R. L.; Cavalcante, G. P. S. “Metodologia para Projeto de Redes Sem Fio Baseada em Medidas de Potência e QoS”, MOMAG 2008, Florianópolis - Santa Catarina, Nov. 2008.
- [27] Rodrigues, J. C.; Fraiha, S. G. C.; Araújo, J. P.; Gomes, H. S.; Francês, C. R. L.; Cavalcante, G. P. S.. “Strategy for WLANs Performance Evaluation Based in Extended Measurement Data for Indoor Environments”, Proceedings of 14^o SBMO -Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica and of 9^o CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Vila Velha-ES, 2010.
- [28] Rodrigues, J. C.; Fraiha, S. G. C.; Araújo, J. P.; Gomes, H. S.; Francês, C. R. L.; Cavalcante, G. P. S. “Empirical Study of the QoS Parameters Behavior of a VoIP Application in Wi-Fi Networks”, *International Microwave and Optoelectronics Conference*, Belém-Pará, IMOC 2009.
- [29] <http://www.netstumbler.com>. Último acesso em 28/12/2010
- [30] Oliveira, A. de, “Auto CAD 2011 3D Avançado – Modelagem e Render com Mental Ray”, 1^a Ed., Ed. Érica, 2011.
- [31] Araújo, J. P. L.; Rodrigues, J. C.; Fraiha, S. G. C.; Gomes, H. S.; Reis, J.; Nandamudi, L. V.; Cavalcante, G. P. S.; Francês, C. R. L., “The Influence of Interference in QoS Parameters in a WLAN 802.11g: A. Proceedings of SPIE”, v. 6776, pp. 677604-01-677604-12, 2007.
- [32] <http://www.openh323.org/>, último acesso 23/03/2011.
- [33] <http://www.radcom.com/>, último acesso 23/03/2011.

[34] <http://www.dast.nlanr.net/projects/Iperf/>, ultimo acesso 23/03/2011.